



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA PAVIMENTOS URBANOS

Trabajo realizado por:

Roberto José Camargo Ramírez

Dirigido por:

Antonio Aguado De Cea

Máster en:

Ingeniería estructural y de la construcción

Barcelona, **Febrero de 2018**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Antonio Aguado de Cea por enseñarme a buscar nuevas maneras de solucionar los problemas asociados a la ingeniería. Así mismo, debo agradecer a Pablo Pujadas por darme el acompañamiento necesario para lograr mis objetivos y siempre darme ánimos.

Quisiera agradecer a mis padres por darme todo en la vida.

RESUMEN

Durante los últimos años ha surgido la necesidad de modificar el uso que se le da al espacio público. Teniendo en cuenta que se debe modificar el uso de dicho espacio público, resulta lógico que sea necesaria la implementación de un nuevo pavimento que sea capaz de satisfacer las nuevas necesidades del espacio público.

La solución propuesta es la utilización de un pavimento por piezas. Las piezas, sin embargo, tiene un diseño innovador. Estas nuevas piezas tendrán sus caras laterales con una inclinación de 7° . Esto facilitará que el mortero de adherencia que se utilice se desplace entre las juntas generadas entre piezas. De esta manera se tendrá un sistema más resistente en cuanto a cargas vehiculares y en cuanto durabilidad. Ahora bien, es necesario estudiar a fondo el comportamiento de estas piezas antes de su implementación en las ciudades.

Para caracterizar dichas piezas se realizó un estudio numérico y un estudio experimental. El estudio numérico determinó que, bajo cargas de tráfico pesado, el sistema funcionará correctamente, siempre y cuando sea posible garantizar una altura libre de mortero de 10 mm o menos. En el caso del estudio experimental no se logró determinar con exactitud la resistencia al arrancamiento de los dos morteros ensayados. Sin embargo, se logró determinar que estos resistirán una fuerza de arrancamiento mayor a 2,50 ton. Así mismo, del estudio experimental se determinó que las piezas individuales cuentan con una resistencia adecuada, pero durante su fabricación se están segregando los áridos gruesos hacia la parte superior de las piezas.

A partir de la información obtenida se determinó que la opción que cuenta con más valor es aquella que utiliza un mortero más líquido, ya que de esta manera es más fácil garantizar la altura requerida, y verificada por el estudio numérico.

ABSTRACT

Over the last few years, the urge to modify the use of public space has taken a key role in the societies. The first option to accomplish this objective is by inventing a new kind of pavement, that can satisfy the new needs of the public space.

The proposed solution is by using a block pavement. These new blocks, however, have an innovative design. The pieces have their lateral faces inclined by 7° . This causes that the mortar used to bind the pieces together to have an easier way to move between the joints created by the pieces. This will translate into a more resistant and more durable structure. It is necessary to dive deep into the behavior of this new pavement before it can be used in different cities across the world.

To study these new pieces a numerical and an experimental study were made. The numerical study determined that under heavy traffic loads, the system will work correctly, but only if the height free or mortar is 10 mm or less. On the other hand, the experimental study couldn't determine the exact pull out resistance of the two types of mortars that were tested. However, it was possible to determine that both mortars will have the pullout resistance over 2,50 ton. The same study also concluded that the individual pieces have the necessary amount of compression and traction resistance. It was noted, however, that the pieces have a segregation towards the top of the section.

From the information obtained it was possible to conclude that the most valuable option is the one that uses the more fluid mortar, because this way it is easier to guarantee the required mortar height, which was verified by the numeric study.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1	<i>Introducción</i>	1
1.2	<i>Objetivos.....</i>	2
1.3	<i>Metodología seguida.....</i>	3
2.	Estado del conocimiento	5
2.1	<i>Introducción</i>	5
2.2	<i>Tendencias de la población.....</i>	6
2.3	<i>Pavimentos urbanos</i>	8
2.3.1	<i>Definición</i>	8
2.3.2	<i>Retos de los pavimentos urbanos</i>	9
2.3.3	<i>Alternativas para pavimentos urbanos</i>	13
2.3.4	<i>Avances recientes en pavimentos urbanos</i>	16
2.4	<i>Conclusiones</i>	18
3.	Estudio numérico	21
3.1	<i>Introducción</i>	21
3.2	<i>Pieza propuesta</i>	22
3.3	<i>Metodología</i>	23
3.3.1	<i>Modelo conjunto.....</i>	23
3.3.2	<i>Propiedades de los materiales</i>	24
3.3.3	<i>Solicitaciones evaluadas</i>	25
3.3.4	<i>Estudio paramétrico</i>	25
3.4	<i>Resultados.....</i>	27
3.4.1	<i>Comportamiento general.....</i>	27
3.4.2	<i>Influencia de la altura libre de mortero</i>	28
3.4.3	<i>Influencia de la inclinación de caras laterales</i>	30
3.4.4	<i>Influencia en la alineación de las piezas</i>	31
3.5	<i>Conclusiones</i>	31

4.	Campaña Experimental	33
4.1	<i>Introducción</i>	33
4.2	<i>Fase I: Consistencia de morteros.....</i>	34
4.2.1	Materiales	35
4.2.2	Dosificación	36
4.3	<i>Fase II: Ensayos de resistencia en conjunto</i>	37
4.3.1	Preparación de muestras	37
4.3.2	Ensayos sobre muestras.....	38
4.4	<i>Fase III: Ensayos de resistencia individuales</i>	40
5.	Resultados	41
5.1	<i>Introducción</i>	41
5.2	<i>Fase I: Consistencia de morteros.....</i>	41
5.3	<i>Fase II: Ensayos de resistencia en conjunto</i>	43
5.3.1	Preparación de muestras	43
5.3.2	Ensayo de arrancamiento	45
5.3.3	Cálculo teórico de fuerza de arrancamiento	48
5.3.4	Consideraciones adicionales.....	49
5.4	<i>Fase III: Ensayos de resistencia individuales</i>	53
5.4.1	Resistencia a la compresión	53
5.4.2	Resistencia a la tracción	55
5.5	<i>Conclusiones</i>	59
6.	Conclusiones y recomendaciones	61
6.1	<i>Introducción</i>	61
6.2	<i>Conclusiones</i>	61
6.3	<i>Recomendaciones</i>	64
7.	Referencias	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	La poblaciones urbanas y rurales del mundo, 1950-2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2014)	7
Figura 2.2	Retos actuales para los pavimentos urbanos	9
Figura 2.3	Esquema de sección de pavimentos por bloques. Adaptado de (McCormack, 2006).....	14
Figura 2.4	(a) Patrón de espina de pescado a 45°; (b) Patrón de espina de pescado a 90; (c) Patrón de parque; (d) Patrón de hiladas. (Paving Directory, 2014)	15
Figura 3.1	Secciones de las piezas diseñadas.....	22
Figura 3.2	Geometría utilizada en los modelos y malla de elementos	23
Figura 3.3	(a) Deformada de la pieza central: (b) Tensiones máximas dentro de la pieza: (c) Tensiones máximas en la interface del mortero	28
Figura 3.4	Influencia de la altura libre de mortero para modelos con piezas intercaladas e inclinación de caras laterales de (a) 0° y (b) 7°	29
Figura 3.5	Influencia del ángulo lateral y altura libre de mortero en el factor de seguridad	30
Figura 3.6	Factor de seguridad en función de la alineación de las piezas	31
Figura 4.1	Sección de las piezas estudiadas	34
Figura 4.2	Curva granulométrica de la arena utilizada	35
Figura 4.3	Muestras utilizadas para los ensayos de arrancamiento	37
Figura 4.4	(a) Montaje experimental para ensayo de arrancamiento. (b) Pieza adherida a los bloques	39
Figura 4.5	Montaje experimental para (a) ensayo de compresión. (b) ensayo de tracción indirecta (brasileño).....	40
Figura 5.1	Construcción de los marcos utilizando el método manual con el M1	44

Figura 5.2	Marcos contruidos con (a) método manual; (b) método industrial.....	44
Figura 5.3	(a) Montaje experimental para el ensayo de tiro; (b) Adhesivo utilizado para anclar la platina metálica a la pieza.....	45
Figura 5.4	(a) Resultados del primer ensayo de tiro; (b) Adición de resina X60 sobre capa más rugosa.....	46
Figura 5.5	Taco metálico utilizado y arreglo final de alternativa	47
Figura 5.6	(a) Sistema de anclaje mecánico y químico utilizado; (b) Resultados de ensayo con el sistema descrito	48
Figura 5.7	Probeta fallada bajo carga de compresión.	54
Figura 5.8	Probeta rota a tracción mediante el ensayo Barcelona.	56
Figura 5.9	Gráfico de fuerza contra recorrido de pistón para (a) Muestra C1; (b) Muestra C2; (c) Muestra C3; (d) Muestra C4; (e) Muestra C5.....	58
Figura 5.10	Sección transversal de las piezas de pavimento	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Alternativas de reemplazo en materiales para bloques de pavimento de hormigón	16
Tabla 2.2	Resumen de los avances relacionados con los pavimentos urbanos	18
Tabla 3.1	Propiedades de los materiales y de la interfaz.....	24
Tabla 3.2	Relación de modelos realizados en el estudio numérico.....	27
Tabla 4.1	Diseño de mezcla 1 para la construcción de las muestras.....	36
Tabla 5.1	Clasificación de morteros de acuerdo con su consistencia (Gutiérrez, 2003)	42
Tabla 5.2	Resultados ensayos de consistencia sobre morteros frescos	42
Tabla 5.3	Alturas y áreas adheridas para las muestras	48
Tabla 5.4	Fuerzas de adherencias calculadas	49
Tabla 5.5	Indicadores utilizados para valoración de alternativas	51
Tabla 5.6	Valores obtenidos para los indicadores de las dos alternativas	52
Tabla 5.7	Valores obtenidos para los criterios de las dos alternativas.....	52
Tabla 5.8	Propiedades geométricas y peso de las muestras ensayadas a compresión.....	53
Tabla 5.9	Resistencia a la compresión de las muestras	55
Tabla 5.10	Propiedades geométricas y peso de las muestras ensayadas a tracción.....	56
Tabla 5.11	Resistencia a la tracción de las muestras	57

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los pavimentos urbanos son casi tan antiguos como las ciudades en sí. Desde la antigüedad, donde se utilizaban adoquines rústicos compuestos por piedras, hasta la actualidad, donde se usan materiales cada vez más innovadores, los pavimentos siempre serán uno de los componentes más importantes de las ciudades. Así como los pavimentos antiguos conllevan una serie de problemas que dieron lugar al desarrollo de nuevas alternativas, los pavimentos actuales también presentan una serie de retos que la sociedad moderna la ha impuesto.

Recientemente, dentro de las ciudades se ha intentado restarle importancia a la circulación de vehículos y se ha buscado devolverles la importancia a los peatones. Debido a la alta congestión de vehículo se han generado problemas que están disminuyendo la calidad de vida de las personas. Fenómenos como la contaminación o el ruido generado son algunos de estos problemas. Por esta razón, se ha llegado a la conclusión que la solución a estos problemas es, como se mencionó, pacificar el tráfico de vehículos y devolver gran parte del espacio público a los residentes de las diferentes zonas. Pero esta solución requiere la modificación del dicho espacio público, por lo tanto, se debe diseñar una nueva alternativa de pavimento que sea apto para la circulación de peatones y de vehículos ocasionales.

Dentro del marco de la redefinición del uso del espacio urbano de Barcelona, adelantado por el Ayuntamiento de Barcelona, se han buscado diferentes tipos de pavimentos que faciliten el tránsito de peatones y vehículos pesados, atendiendo los estándares estéticos y de seguridad. Una de las opciones consideradas es un pavimento por piezas. Se han diseñado un nuevo tipo de adoquín que tiene una forma que en teoría facilitará el proceso constructivo. Sin embargo, es necesario realizar un estudio sobre el posible comportamiento de dichas piezas bajo las sollicitaciones a las que podrán estar sujetas durante su vida útil.

Este estudio se enfocará en estudiar el comportamiento del sistema propuesto bajo las cargas de tráfico. Para realizar esto se elaborará un estudio numérico, donde a través de otro estudio paramétrico será posible caracterizar el comportamiento esperado de las piezas. Así mismo, para complementar este estudio, se realizará un trabajo experimental con el objetivo de caracterizar el comportamiento de la adherencia entre el mortero de unión y las piezas bajo cargas de arranque. Adicionalmente, se hará una breve caracterización del material del que están compuestas las piezas con el objetivo de identificar cualquier problema durante fase de diseño.

1.2 OBJETIVOS

El **objetivo general** del presente trabajo final de máster es caracterizar y verificar el comportamiento de las piezas de adoquín diseñadas por el Ayuntamiento de Barcelona. Las piezas diseñadas tienen una forma troncocónica y están fabricadas de hormigón en masa. Con la forma de las piezas se busca facilitar el método constructivo. Debido a dicha geometría, cuando se disponen las piezas en una cama de mortero, se facilitará el flujo de mortero hacia las juntas formadas por las piezas. Esto se traduce en un sistema con mayor adherencia, y, por lo tanto, más resistente.

Para lograr el objetivo general descrito, se han definido una serie de **objetivos específicos** de acuerdo con las etapas del estudio. A continuación, se presentan los objetivos específicos de este estudio.

- Caracterizar el comportamiento del conjunto de piezas y mortero de unión bajo cargas de tráfico mediante un estudio numérico. De igual manera, se busca determinar la influencia de ciertos parámetros en dicho comportamiento.
- Caracterizar la unión entre el mortero y la pieza bajo cargas de arrancamiento. Se utilizarán diferentes morteros para encontrar la relación entre consistencia y resistencia al arrancamiento.
- Con la información obtenida se hará una valoración de alternativas para determinar cuál de las opciones consideradas resulta ser óptima.
- En último lugar se busca caracterizar la resistencia a la compresión y a la tracción de las piezas individuales.

1.3 METODOLOGÍA SEGUIDA

Para lograr los objetivos descritos anteriormente, el estudio se dividirá en dos partes: estudio numérico y contrastación experimental. La primera de ellas corresponde a la realización de un estudio numérico. Este estudio se centrará en el comportamiento, bajo cargas de tráfico, del conjunto de piezas y mortero de adherencia. Para complementar esta etapa, se define un estudio experimental. La segunda parte se centrará en los procesos constructivos y en la durabilidad del conjunto. En conjunto, la información obtenida permitirá tener una caracterización del comportamiento esperado de las piezas estudiadas.

El presente documento se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Introducción: En este capítulo se presenta una breve descripción del problema afrontado, y se definen los objetivos, generales y específicos, del estudio. Así mismo se presenta la metodología a seguir para lograr dichos objetivos.

Capítulo 2: Estado del arte: Donde se presentan las necesidades de la implementación de la solución propuesta y se hace una breve recopilación de los intentos de otros autores para solucionar los problemas de las ciudades con respecto a los pavimentos.

Capítulo 3: Estudio numérico: En este capítulo se describe el estudio numérico elaborado. De igual manera se presentan los resultados obtenidos.

Capítulo 4: Campaña experimental: Como paso previo a la presentación de los resultados obtenidos en laboratorio, se describe en este capítulo la metodología seguida para realizar todos los ensayos.

Capítulo 5: Resultados: En este capítulo se presentan y se discuten los resultados obtenidos durante la fase experimental de este estudio.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones: Se resumen los mayores hallazgos del estudio presentado. De igual manera, se realizan una serie de recomendaciones que pueden ser tenidas en cuenta al momento de realizar investigaciones adicionales sobre las piezas.

Capítulo 7: Referencias: En último lugar, se presentan las referencias utilizadas a lo largo de este estudio.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

Durante el último siglo, la humanidad ha tenido, sin duda, un nivel de desarrollo muy importante. Ya sea social, tecnológico o económico, la calidad de vida promedio ha sufrido un cambio significativo. Como cualquier tipo de cambio, el fenómeno descrito ha traído una serie de consecuencias que deben ser afrontadas por la sociedad actual. Uno de los desarrollos más importantes es el desarrollo urbano. La tendencia mundial en cuanto al desarrollo urbano es la relocalización de habitantes de zonas rurales hacia núcleos urbanos. De igual manera, estos núcleos urbanos presentan un crecimiento geográfico, reduciendo así el porcentaje de área rural en determinado país. De acuerdo con esto, el término “urbanización”

“se refiere tanto a una condición en el tiempo como a un proceso que ocurre a lo largo del tiempo [...] la urbanización como un proceso se refiere al incremento en el nivel de urbanización, esto es, el incremento en el porcentaje de población urbana. El ritmo de urbanización se refiere entonces, al ritmo de crecimiento en el nivel de urbanización” (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2014).

Es importante, entonces, analizar hacia dónde se está moviendo la población actual y futura. Una manera de realizar este análisis es observando cómo ha cambiado la población a través de los años, y cuál es la tendencia.

En este capítulo se busca demostrar la necesidad de un cambio en el desarrollo de los pavimentos urbanos. Así mismo, se busca determinar los últimos avances realizados por diferentes autores respecto a este tema. Esto ayudará a clasificar la prioridad de la innovación de las piezas objeto de estudio.

2.2 TENDENCIAS DE LA POBLACIÓN

De acuerdo con un estudio realizado por la ONU en el año 1980 (United Nations, 1980), se estimaba que para el año 2000, la población urbana en todo el mundo sería aproximadamente de 3 208 028 (miles). En comparación con las 724 147 (miles) de personas registradas en el año 1950, el crecimiento disparado se encontraba previsto hace más de 40 años. De igual manera, para la población rural, dicho estudio estimó que para el año 2000 el número de habitantes en estas zonas ascendería a 3 045 956 (miles). Aunque es un número similar a los habitantes de zonas urbanas, el estudio muestra que en el año 1950 había alrededor de 1 776 924 (miles) de personas en zonas rurales. Este número es más del doble de habitantes en zonas urbanas para el mismo año, sin embargo, para el año 2000, la proyección muestra que el número de habitantes en ambas zonas sería muy similar.

Ahora bien, de acuerdo con los estudios realizados en años recientes por la ONU (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2014) el proceso de urbanización ha sufrido un crecimiento importante durante las últimas seis décadas. Actualmente, alrededor del 54% de la población mundial se encuentra asentado en áreas urbanas (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2014).

La Figura 2.1 muestra la tendencia histórica de la población urbana y rural desde el año 1950, con una proyección hasta el año 2050. En esta figura se observa que alrededor del año 1995, la población rural ha tenido un incremento casi nulo en cuanto a habitantes, mientras que, para todos los años mostrados en la figura, la población urbana ha tenido un crecimiento marcado. Este crecimiento no muestra señales de decrecer en los próximos años, por lo tanto, se espera que para el año 2050, alrededor de dos tercios (aproximadamente el 66.6%) de la población se

encuentre en áreas urbanas (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2014; United Nations/DESA, 2013).

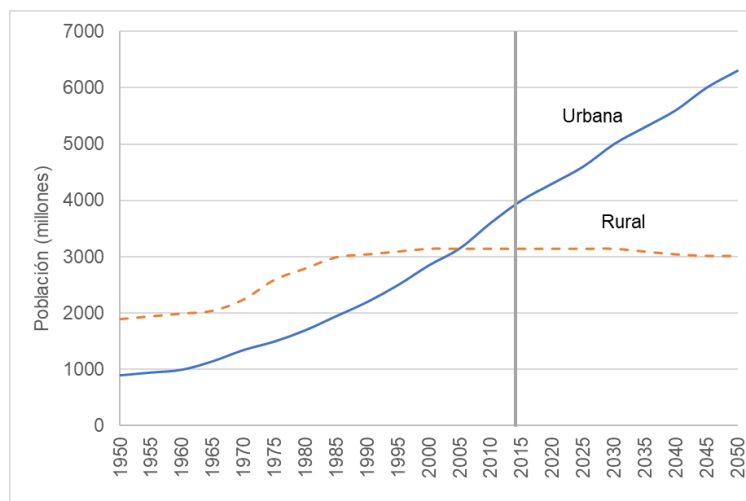


Figura 2.1 La poblaciones urbanas y rurales del mundo, 1950-2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2014)

De igual manera, se observa que en el año 2000 el número de habitantes en zonas urbanas era del orden de 3 000 000 (miles), lo que coincide con lo predicho por este mismo organismo en el estudio publicado en el año 1980, y que fue descrito anteriormente.

El comportamiento descrito puede explicarse de diferentes maneras, teniendo en cuenta la complejidad que conlleva el análisis del comportamiento humano. Este nivel de complejidad se aumenta al realizar el análisis a nivel mundial. No obstante, Basudeb Bhatta (2010), en su libro *“Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data”* realiza un extenso análisis sobre las causas de este comportamiento.

Se considera que las principales causas descritas, dentro del alcance del presente documento, son el crecimiento de la población, la toma independiente de decisiones, el crecimiento económico, la industrialización y otras causas geográficas. De igual manera United Nations (2014) en su documento *“World Urbanization Prospects”* menciona unos causantes similares a los descritos por el autor mencionado.

El aumento del nivel de urbanización significa unos impactos importantes para las ciudades. Entre estos se encuentran la inflación de costos de infraestructura, disminución en la calidad de vida, ineficiencia energética, y muchos otros que son importantes dentro de su campo de estudio (Bhatta, 2010). En el campo de la ingeniería se podría encontrar la solución a varios de los problemas descritos. Dentro de las ciudades entre un 30 y un 45% (dependiendo de la ciudad) de la superficie total se encuentra cubierta con pavimentos (EPA, 2008), entonces resulta lógico que la cantidad de esfuerzo enfocada a solucionar estos impactos a través de la mejora de los pavimentos sea importante.

La solución a todos estos efectos negativos se transforma, entonces, en una serie de retos específicos que deben ser abordados por los ingenieros, como, por ejemplo, reducir la temperatura de la superficie de las ciudades, reducir el impacto ambiental de la construcción de vías, fomentar de nuevo el uso del espacio público para aumentar la calidad de vida, etc. En el siguiente apartado se realiza un análisis más detallado sobre algunos de los retos que se deben afrontar.

2.3 PAVIMENTOS URBANOS

2.3.1 Definición

Como su nombre lo indica, los pavimentos urbanos corresponden al recubrimiento de la superficie del espacio de circulación, ya sea de vehículos o peatones. Existe una diferencia grande con respecto a los pavimentos rurales. Principalmente, las condiciones topográficas, de uso y de espacio causan que los retos inherentes a los pavimentos urbanos no sean compartidos con los pavimentos rurales.

Como se mencionó anteriormente, los pavimentos urbanos requieren un desarrollo que sea capaz de solucionar los retos causados por el aumento del nivel de urbanización dentro de las grandes ciudades. En el siguiente apartado se describen algunos de estos desafíos, y las condiciones que deberían cumplir.

2.3.2 Retos de los pavimentos urbanos

Los retos o requerimientos de los pavimentos urbanos se pueden dividir en cuatro categorías dependiendo de cómo modifican el concepto clásico del pavimento urbano. Estas categorías son los aspectos estructurales, aspectos funcionales, aspectos de ejecución y aspectos de mantenimiento. En la Figura 2.2 se sintetizan estos aspectos, y algunos parámetros que se podrían incluir dentro de estos. A continuación, se analizan cada uno de los aspectos descritos en la Figura 2.2.

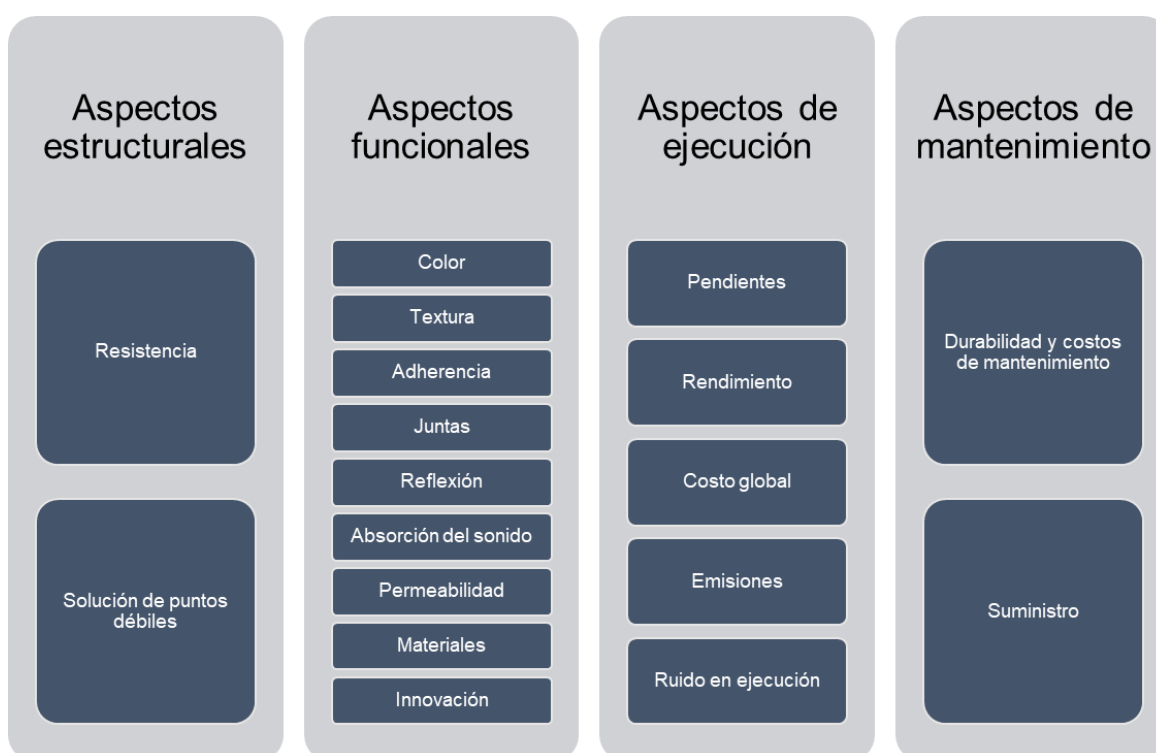


Figura 2.2 Retos actuales para los pavimentos urbanos

Aspectos estructurales

En primer lugar, los retos en cuanto a aspectos estructurales que deben afrontar los pavimentos urbanos son de vital importancia. Esto es debido a que, aunque los pavimentos pueden incorporar nuevas funcionalidades, no pueden dejar de cumplir el objetivo principal para el cual son construidos. Este es, transmitir las cargas del tránsito hacia el suelo de fundación, cumpliendo con los requerimientos de seguridad establecidos para cada uno de ellos.

- Resistencia: El pavimento urbano debe tener la resistencia adecuada para aguantar las fuerzas ejercidas por la circulación de vehículos. Adicional a esta solicitud, el pavimento debe ser capaz de aguantar las cargas de peso propio, cargas muertas y sobrecarga de uso.
- Solución de puntos débiles: Usualmente, los pavimentos conllevan la instalación o construcción de elementos. Estos elementos pueden ser bordes, juntas, sumideros, alcantarillas, etc. y son susceptibles a la rotura o a la fisuración, por lo tanto, se debe buscar una solución que no disminuya la resistencia ni afecte el aspecto de estos puntos.

Aspectos funcionales

La funcionalidad de los pavimentos urbanos puede aumentada a medida que se desarrollan nuevas tecnologías. A continuación, se presentan los principales aspectos funcionales que pueden ser adoptados por lo pavimentos urbanos modernos.

- Color: Dado que el color oscuro de los pavimentos no refleja la luz solar, el pavimento urbano actual tiende a calentarse y a retener este calor en la superficie. Al tener un pavimento de un color más reflectivo, se podría reducir exitosamente la temperatura superficial de todas las áreas cubiertas con este material.
- Textura: Con un cambio de textura se debe buscar que la limpieza sea pueda realizar de una manera más sencilla. De igual manera, la textura debe permitir que la señalización horizontal se mantenga, al menos, el mismo tiempo y con el mismo grado de durabilidad que en las vías básicas.
- Adherencia: Se debe buscar que el pavimento tenga la rugosidad adecuada y la suficiente adherencia tanto con las llantas de los vehículos como con el calzado de los peatones, de tal manera que se evite el deslizamiento bajo cualquier condición climática.
- Juntas: Con el objetivo de tratar e identificar el nuevo pavimento por una serie de bloques, se deberán instalar una distribución de juntas, tanto estructurales como decorativas. La instalación de estas juntas facilitará la identificación y el mantenimiento de los pavimentos. También se permite diferenciar los

pavimentos urbanos instalados de los pavimentos que componen la red básica de la ciudad.

- Reflexión: Similar al caso del cambio de color, se debe buscar que los pavimentos tengan la capacidad de reflejar la luz incidente. En este caso, no solamente se busca reflejar la luz solar, sino la reflexión del iluminado urbano, lo que podría causar una reducción en la demanda del mismo. Al final, esto se traduce en la reducción del consumo energético de las ciudades y una mayor eficiencia energética de las mismas.
- Absorción del sonido: Con el objetivo de disminuir la contaminación auditiva dentro de las ciudades, se puede buscar que el pavimento urbano tenga capacidades de absorción de sonido generado, o al menos que no amplifique el mismo. En cambio, se debe fomentar la utilización de vehículos eléctricos o con motores que emitan sonidos reducidos.
- Permeabilidad: El pavimento podría tener características drenantes de tal manera que el subsuelo pueda absorber el agua pluvial. Con esto se espera que el ciclo del agua sea mejor y más eficiente dentro de los núcleos urbanos, y que la cuña salina tenga un mayor tamaño.
- Materiales: Se debe buscar que se favorezca la reutilización de materiales. En lo posible, si los materiales a reutilizar provienen de la urbanización existente se promueve la sostenibilidad en la construcción. Asimismo, la utilización de materiales contaminantes provenientes de otra industria, tomando las precauciones adecuadas, sería una buena práctica.

Aspectos de ejecución

Aunque se busca que los pavimentos tengan el mayor número de prestaciones posibles, se debe considerar la complejidad de la ejecución del mismo. En algunos casos, debido a la complicación del sistema que se quiera instalar, el proyecto puede dejar de ser sostenible económicamente. De acuerdo con esto, se debe tener en cuenta una serie de aspectos de ejecución que ayudarán a determinar si cierto tipo de pavimento es o no apto para su construcción.

- Pendientes: En primer lugar, se debe garantizar la conformación de las pendientes longitudinales y transversales especificadas en el proyecto para permitir la evacuación de aguas de escorrentía superficial.
- Rendimiento: Se debe buscar que el rendimiento de colocación por m² sea el máximo posible, y que los tiempos de ejecución para su puesta en servicio sean cortos. Ahora bien, previo a la construcción de estos pavimentos, se debe conocer las necesidades de ocupación de espacio público durante la ejecución de las obras.
- Costo global: El costo global de las obras debe estar disponible a través de un desglose lo más detallado posible. Esto reducirá la probabilidad de errores y facilitará la comparación entre propuestas económicas de diferentes alternativas.
- Ruido en ejecución: El nivel de ruido durante construcción se debe considerar antes de iniciar las obras. Se debe evaluar si este nivel supera el máximo permitido dentro de la ciudad, y el tiempo de duración del mismo. Esto se hace con el objetivo de generar la menor molestia a los ciudadanos que se encuentran por la zona. Adicional a esto, se debe calcular las emisiones de gases de tipo invernadero hacia la atmósfera y determinar el impacto ambiental de estas.

Aspectos de mantenimiento

Con la instalación de pavimentos con nuevas prestaciones, diferentes a los pavimentos tradicionales, los planes de mantenimiento se deben adaptar a las nuevas necesidades de la estructura. Entonces, se debe considerar si el mantenimiento y los materiales requeridos se adecúan a las exigencias de sostenibilidad de la estructura.

- Durabilidad y costos de mantenimiento: Las características y prestaciones para las cuales fue diseñado el pavimento se deben mantener durante el mayor periodo posible. Se ha de respetar un equilibrio económico razonable entre los costos de implantación del mantenimiento, y la frecuencia del mismo. Es decir, se debe buscar un sistema que requiera no requiera mantenimiento durante largos periodos, y que los costos de dicho mantenimiento sean relativamente bajos.

- **Suministro:** En cuanto al suministro del pavimento, se debe tener un material cuya fórmula y manera de ejecución sean conocidas y sin ningún tipo de patente. Esto permite tener plazos cortos entre suministros y de esta manera se permite afrontar cualquier tipo de eventualidad que implique la reposición del material de manera rápida y eficiente. Con esto se evitan retrasos en la construcción.

2.3.3 Alternativas para pavimentos urbanos

Dentro de las ciudades es posible encontrar, en general, dos tipos de pavimentos. Los pavimentos destinados para los vehículos y los pavimentos destinados para los peatones y vehículo ligeros. El primer tipo de pavimentos puede estar fabricado en materiales flexibles (materiales bituminosos) o en materiales rígidos (hormigón), mientras que el segundo tipo de pavimentos generalmente están compuesto por adoquines. Considerando que uno de los principales objetivos de las ciudades es pacificar el tráfico y devolver el espacio público a los peatones, es lógico que se busque innovar dentro de este tipo de pavimentos.

La alternativa considerada para la construcción de pavimentos son los pavimentos por bloques (adoquines). Debido a su reducido coste (en comparación con los pavimentos continuos), a su método constructivo simplificado y a su mejor apariencia estética, la utilización de estos bloques resulta ser una opción atractiva. Los pavimentos por bloques pueden ser de dos tipos dependiendo del material utilizado para los bloques. Los bloques de hormigón (CBP por sus siglas en inglés) y los bloques de ladrillo de arcilla son los más utilizados actualmente. En cuanto al proceso constructivo, la pavimentación por bloques se clasifica, nuevamente, en dos tipos (McCormack, 2006).

- **Flexible:** Los bloques se colocan sobre una cama de arena. Las juntas se rellenan con arena fina, es decir, este tipo de pavimento no tiene ningún tipo de material ligante.
- **Rígido:** En este caso, los bloques se colocan sobre una cama de mortero sin fraguar. Las juntas son rellenas con mortero. Este documento se enfocará en los pavimentos rígidos, debido a su mayor capacidad de carga y reducido mantenimiento

Generalmente este tipo de pavimentos consta de cinco capas de diferentes materiales que permite el correcto funcionamiento del sistema. La Figura 2.3 muestra el esquema general de estas capas. En el caso de los pavimentos rígidos, las capas de la base y la sub-base pueden ser reemplazadas por una solera de hormigón de menor espesor. Se observa que, aunque el arreglo final es similar al utilizado por los pavimentos continuos, el método constructivo difiere en varios aspectos.

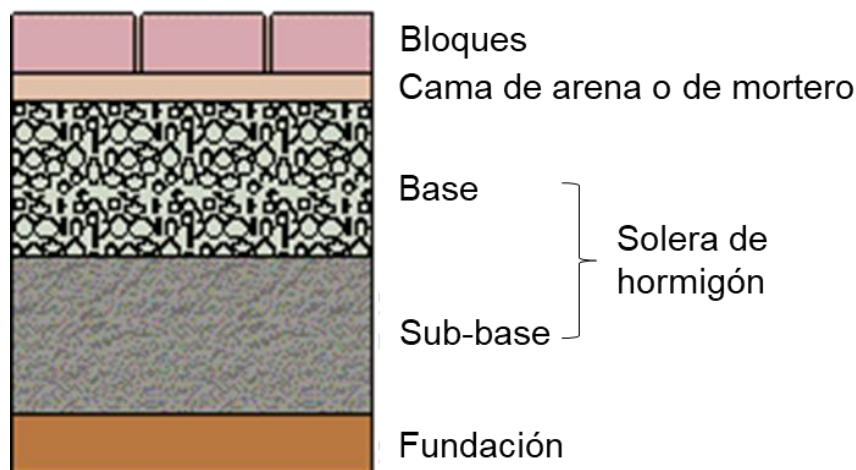


Figura 2.3 Esquema de sección de pavimentos por bloques. Adaptado de (McCormack, 2006)

A continuación, se describe brevemente el método constructivo para los pavimentos rígidos (Cerámica Malpesa, 2003):

- 1) Construcción de la base del pavimento.
- 2) Extender la capa de mortero sobre la base. Esta capa debe ser de espesor constante y dependerá de las condiciones de cada obra.
- 3) Ubicar los bloques en el patrón deseado. Se recomienda mezclar bloques de diferentes lotes para igualar cualquier diferencia de color o dimensión que se pueda encontrar.
- 4) Se asentará cada adoquín o bloque por medio de mazos de goma y reglas metálicas o de madera para garantizar su nivel y posición.
- 5) Con los adoquines colocados y nivelados, se procede a rellenar las juntas con mortero (de igual dosificación al utilizado en la cama). La consistencia de este debe ser más fluida.

- 6) Se procede a realizar la limpieza de cualquier resto de mortero sobre las caras expuestas de los bloques.

Un aspecto constructivo que requiere consideración adicional es el patrón de colocación de los bloques, ya que la facilidad de construcción, vida útil, mantenimiento dependen directamente de esta geometría. En la Figura 2.4 se presentan los patrones más comunes utilizados en los pavimentos por bloques.

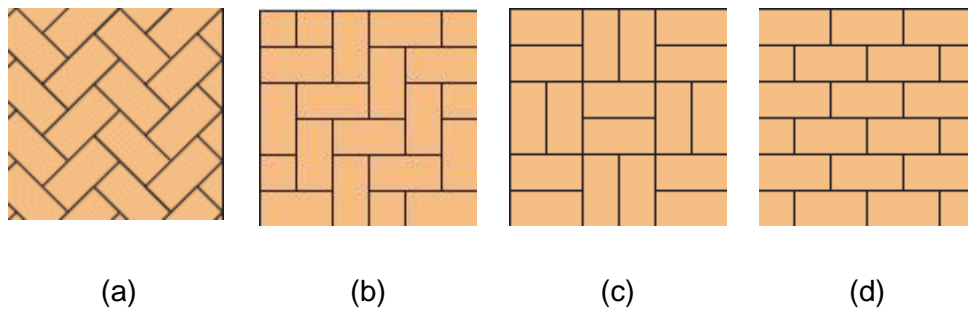


Figura 2.4 (a) Patrón de espina de pescado a 45°; (b) Patrón de espina de pescado a 90°; (c) Patrón de parquet; (d) Patrón de hiladas. (Paving Directory, 2014)

Adicional a los patrones mostrados en la Figura 2.4 los bloques se pueden disponer en líneas rectas uno detrás de otro. El tipo de patrón dependerá también del tipo de tráfico que circulará sobre el pavimento. En el caso del tráfico vehicular, por ejemplo, se recomienda utilizar el patrón de espinas de pescado o en hileras atravesadas a la dirección de circulación (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013).

Ahora bien, para la caracterización de este tipo de pavimentos, usualmente se utiliza el ensayo estándar de resistencia a flexión con carga en el centro de luz (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013). No obstante, se pueden utilizar otros ensayos como la resistencia a la abrasión, densidades y contenido de humedad como indicadores de la calidad de los bloques (Humpola, Bullen, & Knapton, 1996).

En el siguiente apartado se presentan los recientes avances en cuanto a este y otros tipos de pavimentos urbanos.

2.3.4 Avances recientes en pavimentos urbanos

A pesar de que la utilización de bloques para los pavimentos urbanos no es una nueva idea, en los últimos años se han hecho varios avances tecnológicos que contribuyen a mejorar la sostenibilidad de las construcciones con este material.

La mayoría de las innovaciones estudiadas para los pavimentos por bloques se enfocan en la utilización de nuevos materiales para componer dichos bloques. Desde materiales comunes y corrientes como el caucho reciclado (Da Silva, Gachet Barbosa, Lintz, & Jacintho, 2015) hasta la utilización de sedimentos contaminados (Wang, Yeung, Lau, Tsang, & Poon, 2017), varios autores han logrado demostrar que el comportamiento de los bloques que incorporan un diferente material es satisfactorio.

En la Tabla 2.1, se muestran algunos de los estudios realizados por varios autores. Se sintetizó la información presentada por cada autor y se ideó un sistema de clasificación de tres niveles, dependiendo del grado de éxito en la utilización de cierto material. Este sistema se basa en el cumplimiento final o no de las normativas para las propiedades finales de los bloques.

Tabla 2.1 Alternativas de reemplazo en materiales para bloques de pavimento de hormigón

Material	Experiencia	Autor
Caucho reciclado de neumático	+	(Da Silva et al., 2015)
Sedimento contaminado reciclado	+	(Wang et al., 2017)
Materiales de desecho de industria	+	(Ganjan et al., 2015)
Escoria de horno alto y humo de sílice	+	(Limbachiya, Ganjan, & Claisse, 2016)
Hormigón de barro	+	(Udawattha, Galabada, & Halwatura, 2017)
Polvo de horno de cemento	+/-	(Sadek, El-Attar, & Ali, 2017)
Sedimentos marinos no contaminado	+	(Said, Missaoui, & Lafhaj, 2015)
Desecho de pulido de cerámica	+	(Santos et al., 2015)
Ladrillo triturado	+/-	(Jankovic et al., 2012)
Residuo de mármol	+/-	(Gencel et al., 2012)
Ladrillo triturado	+/-	(Poon & Chan, 2005)
Desecho de producción de cerámica	+	(Wattanasiriwech et al., 2009)

Se observa, entonces, que, en la mayoría de los estudios realizados, los resultados fueron satisfactorios. Esto significa que los bloques producidos por estos autores tienen la resistencia requerida, y demás propiedades, suficiente para ser

utilizados en construcción. Por ejemplo, en el caso de los bloques elaborados con hormigón de barro, ya han sido utilizados en algunas zonas en Sri Lanka (Udawattha et al., 2017). Los materiales que tiene su experiencia clasificada como +/-, corresponden a materiales que, si bien cumplen con algunas características, otras se ven disminuidas. En todos los casos se demuestra que es posible cumplir con todos los requerimientos al mezclar estos materiales con los tradicionales.

Adicionalmente a los estudios mostrados en la Tabla 2.1, distintos autores han realizado avances importantes en cuanto a la prestación de funciones adicionales en los pavimentos tradicionales. Los estudios realizados se pueden clasificar en seis grandes categorías. Una gran proporción de los estudios se enfocan en la utilización de materiales o colores reflectivos en los pavimentos. Esto se hace con el objetivo de reducir las temperaturas en la superficie de los pavimentos en climas calientes contribuyendo al alcance de diferentes objetivos sostenibles. Así mismo, la segunda categoría en la cual se ha realizado un número importante de avances es en almacenamiento de energía.

Estos avances utilizan las condiciones del entorno para generar energía y almacenar la misma. Adicional a la generación de energía, la mayoría de sistemas ideados también reducen las temperaturas en superficie de los pavimentos.

En la Tabla 2.2 se muestra un resumen del estudio de literatura realizado sobre los posibles valores añadidos que se lo pueden dar a los pavimentos urbanos. Una vez más, se ideó un sistema de clasificación de tres niveles (+, +/- y -) basado en el éxito reportado por los autores en sus estudios.

En este caso, la gran mayoría de estudios realizado también tuvieron resultados satisfactorios. Las excepciones encontradas corresponden a tecnologías muy nuevas que en un futuro pueden arrojar resultados satisfactorios. Es importante observar que muchos de los estudios mostrados en la Tabla 2.2 se realizaron sobre pavimentos continuos, con la excepción de algunos estudios realizados sobre bloques reflectivos de hormigón. Por lo tanto, hace falta una investigación detallada sobre las funciones adicionales que pueden incorporar los pavimentos por bloques durante su funcionamiento y durante la fase de construcción.

Tabla 2.2 Resumen de los avances relacionados con los pavimentos urbanos

Categoría	Sistema	Experiencia	Autor
Reflectivos	Asfalto y hormigón reflectivo	+/-	(Qin, 2015)
		+/-	(Rehan, 2016)
		+	(Yang et al., 2016)
		+	(Rossi et al., 2016)
		-	(Yuan et al., 2017)
		+	(Battista & Pastore, 2017)
		+	(Kyriakodis & Santamouris, 2017)
		-	(Li, Saboori, & Cao, 2016)
Evaporativo	Pavimento termocrómico	+	(Sha et al., 2017)
	Poroso	+/-	(Qin, 2015)
		+	(Fini et al., 2017)
		+/-	(Qin, 2015)
		+/-	(Qin, 2015)
Almacenamiento de energía	Cosechador de calor	+/-	(Qin, 2015)
		+	(Pan et al., 2015)
		+	(Zhou et al., 2015)
	Pavimentos conductores	+	(Chiarelli et al., 2015)
		+/-	(Qin, 2015)
		+	(Chen, Wang, & Zhu, 2017)
Deslizamiento	Fotovoltaicos	+	(Efthymiou et al, 2016)
		+	
		+	
Sonoreductor	Pavimentos piezoeléctricos y termoeléctricos	-	(Guo & Lu, 2017)
	Vidrio triturado como árido	+	(Ziari et al., 2017)
	Variación de porosidad de la capa de rodadura	+	(Chu, Fwa, & Tan, 2017)
Sensibles	Conchas y semilla de palma de aceite como árido	+	(Khankhaje et al., 2017)
		+	(Han et al., 2011)

2.4 CONCLUSIONES

A partir de la investigación del estado del arte es posible realizar algunas conclusiones. En primer lugar, es claro que el crecimiento de la población urbana significa un cambio en el paradigma del diseño de las ciudades. Durante las pasadas décadas, se había pensado que el se debía desarrollar las ciudades para el tránsito de vehículo de combustión, sin embargo, las experiencias han demostrado que, al contrario, se necesita modificar dichos desarrollos para que el protagonismo sea del ciudadano. De esta manera se fomenta el transporte a pie, por medio de vehículos ligeros y por medio del transporte público. Esto significa que ha habido varios desarrollos en cuanto a los pavimentos urbanos.

En primer lugar, los pavimentos por piezas, que han existido desde la antigüedad, han vuelto a ser una opción viable para su implementación dentro de las ciudades. Esto se debe a que su aspecto estético es más llamativo, que el de otros pavimentos, para los peatones, sin comprometer ninguna función estructural. Ahora bien, los avances recientes se han enfocado en la utilización de otros materiales para la fabricación de dichos materiales.

Por otro lado, los pavimentos urbanos diseñados para vehículos de combustión también han tenido una serie de avances en los últimos años. Una gran parte de estos avances se han encaminado hacia la reducción de la temperatura de la superficie de dichos pavimentos, ya sea mediante métodos reflectivos o absorción de agua. Otras opciones más ambiciosas han intentado utilizar la energía solar recibida por estas superficies con diferentes propósitos.

Ahora bien, no muchos autores se han enfocado hacia la mejora de los procesos constructivos, en algunos casos incluso los hacen más complicados. En el caso de los pavimentos por piezas, cuyo método constructivo no ha cambiado drásticamente desde su implementación, no se han publicado avances en cuanto a este tema. Es por eso por lo que, dentro del alcance de este estudio, se considera importante un juicio sobre la posible mejora de dicho proceso constructivo, la cual es una de las ventajas de la utilización de las piezas de adoquín estudiadas en este documento.

3. ESTUDIO NUMÉRICO

3.1 INTRODUCCIÓN

Hasta ahora, se ha logrado determinar la necesidad de la implementación de un nuevo tipo de pavimento en las ciudades. En este documento, se presenta el desarrollo realizado por el Ayuntamiento de Barcelona en cuanto al diseño de una nueva pieza de adoquín que podría ser utilizado en la ciudad. Esta nueva pieza mejora el proceso constructivo, y logra un conjunto más resistente.

El objetivo de este capítulo es obtener una caracterización del comportamiento estructural del conjunto conformado con las nuevas piezas. Este comportamiento se estudiará bajo las cargas de tráfico de vehículos pesados. Así mismo, para lograr el objetivo de este capítulo se modelarán las piezas en un ordenador para realizar un análisis de elementos finitos. Dentro de este análisis se incluirá un estudio paramétrico para determinar la influencia de diferentes parámetros en el comportamiento del sistema.

3.2 PIEZA PROPUESTA

Las piezas de pavimento tienen la sección mostrada en la Figura 3.1. Estas piezas tendrán una altura de 90 o de 120 mm, y la inclinación de sus caras laterales es de 7°. La principal razón de ser de este nuevo diseño es la simplificación del proceso constructivo. En teoría la inclinación presente en las caras laterales de las piezas permitirá el flujo del mortero a través de las juntas. Esto significará que la altura de mortero adherida a las piezas será mayor, lo que significa un conjunto más resistente. Así mismo, al tener un flujo menos restringido entre junta, es posible que la colocación de las piezas sea más rápida y sencilla.

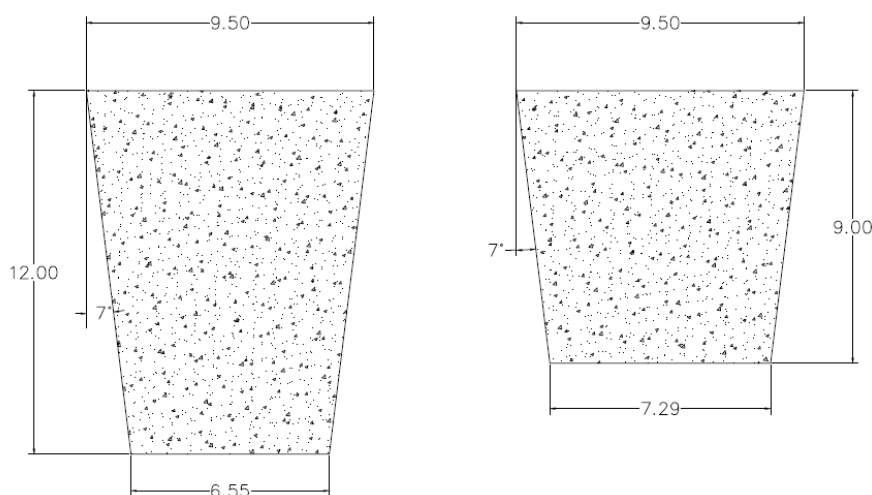


Figura 3.1 Secciones de las piezas diseñadas

Las ventajas de la utilización de estas piezas en comparación con las que se han utilizado previamente (sin inclinación lateral), radican, entonces en la facilidad constructiva y en la resistencia superior bajo cargas de tráfico. En cuando a las desventajas, se observa que se requiere mayor cantidad de material ligante, ya que hay mayor espacio que debe ser rellenado. De igual manera, si se modifica el proceso constructivo, es posible que tome mayor tiempo la capacitación de contratistas sobre el nuevo método. Sin embargo, a partir de los resultados del estudio presentado será posible definir nuevas ventajas e inconvenientes asociados a las nuevas piezas.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 Modelo conjunto

El primer paso del estudio numérico es la elaboración del modelo de elementos finitos. Teniendo en cuenta que se busca estudiar el comportamiento del conjunto diseñado, no basta con modelar una pieza individual y el mortero que la rodea. Es necesario, modelar un conjunto de 9 piezas (3x3) (ver Figura 3.2), de tal manera que la zona caracterizada (pieza central) se encuentra bajo unas condiciones que se asemejen a las condiciones en las que se podría encontrar el pavimento una vez haya sido construido. En este caso, las piezas que rodean la pieza central simulan dichas condiciones del entorno a las que estaría sujeta el conjunto.

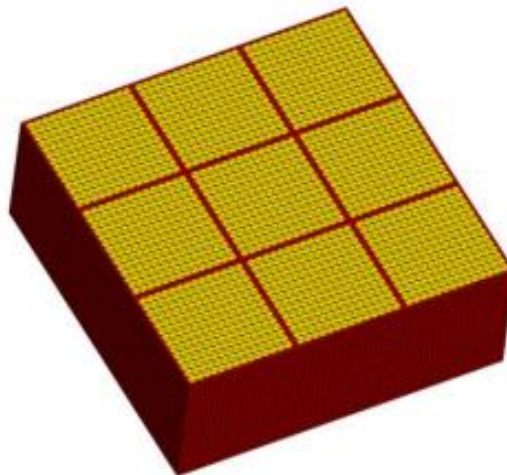


Figura 3.2 Geometría utilizada en los modelos y malla de elementos

Ahora bien, se consideraron dos opciones para definir las condiciones de contorno del modelo. En primer lugar, se consideró definir unos muelles sobre los bordes, de tal manera que se pueda simular el módulo elástico equivalente de dicho contorno. No obstante, la dificultad que conlleva la definición de los coeficientes de rigidez de estos muelles es considerable, ya que dependiendo del valor se puede estar afectando la seguridad del sistema, lo que causó que esta opción fuera descartada. En cambio, se optó por asignar una restricción total del desplazamiento perpendicular a cada plano, es decir, que las piezas de contorno no sufrirán desplazamientos. Los resultados obtenidos con esta opción serán conservadores, por lo tanto, se asegura que dichos resultados estarán del lado de la seguridad.

A partir de un breve estudio de sensibilidad, se decidió utilizar elementos en forma de paralelepípedo con dimensión de 4 mm. Esto resulta en una malla de entre 150 y 200 mil elementos, tal como se muestra en la malla utilizada de la Figura 3.2 .

Con el objetivo de simular la interacción del mortero ubicado entre las piezas se introdujeron elementos de interface planos. De esta manera es posible determinar las tensiones normales y tangenciales causadas por las solicitaciones analizadas. Estos elementos sólo se encuentran donde hay mortero, por lo tanto, no se considera ningún material en la altura libre dejada entre la superficie superior de la pieza y el mortero.

3.3.2 Propiedades de los materiales

Para caracterizar los materiales a utilizar en las simulaciones, es necesario la aplicación de una serie de leyes constitutivas que se encargan de determinar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones. Se considera que los elementos no pueden presentar fisuraciones o desprendimientos de ningún tipo bajo el estado de carga límite. Esto significa que el análisis será de tipo elástico lineal. Se realizará una verificación del estado límite de fisuración, utilizando las propiedades elástico-lineales de cada material para determinar las tensiones. Estas tensiones no deberán superar la resistencia de los materiales o de la interface, ya que, si esto sucede, se presentaría la situación de fisuración o desprendimiento que se busca evitar bajo cualquier condición. En la Tabla 3.1 se presentan las propiedades consideradas para cada material.

Tabla 3.1 Propiedades de los materiales y de la interfaz

Elemento	Propiedad	Valor
Pieza	Módulo elástico (MPa)	30000
	Módulo de Poisson (-)	0.20
Mortero	Módulo elástico (MPa)	20000
	Módulo de Poisson (-)	0.20
Interfaz plana	Rigidez normal (N/mm ²)	1E9
	Rigidez tangencial (N/mm ²)	1E9

3.3.3 Solicitaciones evaluadas

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, se busca simular las cargas de tráfico a las que estarían sometidas las piezas. Esto se realiza mediante la aplicación de cargas verticales y horizontales causadas con el tráfico de vehículos pesados, el caso más crítico. Dicho tráfico se consideró como una carga de 13 toneladas transmitida a través de un eje tándem de 4 ruedas. Cada rueda tiene una superficie de contacto de 300x250 mm. Esto se traduce en una tensión de 0.40 MPa sobre toda la superficie de las ruedas.

Ahora bien, además de la carga vertical aplicada por el tráfico, también se buscó considerar una carga horizontal causada por el giro de las llantas de los vehículos durante el arranque y el frenado de los mismos. Para estimar la tensión causada por esta acción se utilizó la ley del rozamiento, la cual indica que la carga máxima tangencial equivale a la carga máxima vertical multiplicada con un coeficiente de rozamiento. Para este estudio se estimó un valor de coeficiente de 0,80. De acuerdo con esto, la tensión horizontal obtenida es de 0,32 MPa.

Con el objetivo de encontrar la cercanía a la falla del sistema (desprendimiento de alguna pieza), se utilizará el concepto de factor de seguridad. Este factor es un coeficiente que relaciona la resistencia y la sollicitación para cualquier estructura. Este factor debe tener un valor superior a 1 y se calcula de acuerdo con la Ecuación 3.1.

$$FS = \frac{f}{\sigma_{\max}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde: FS es el factor de seguridad

f es la capacidad resistente del material

σ_{\max} es la tensión causada por la sollicitación

El cálculo del factor de seguridad (FS) se realizará considerando una resistencia característica a tracción de la pieza, del mortero y de la interface igual a 2,46, 1,80 y 1,62 MPa, respectivamente, a menos que se especifique lo contrario.

3.3.4 Estudio paramétrico

Se consideraron tres variables importantes en el desarrollo del estudio numérico. En primer lugar, el ángulo de las caras laterales de las piezas. Aunque

inicialmente se encuentra fijado en un valor de 7° , se consideraron dos valores adicionales (0 y $3,5^\circ$) con el fin de evaluar la influencia de este parámetro en el comportamiento del conjunto. Cabe mencionar que un ángulo menor dificulta la introducción de las piezas en el mortero, lo que podría causar un llenado deficiente de las juntas.

El segundo parámetro que se va a modificar es la altura entre la cara vista de la pieza y el mortero dentro de la junta. Teniendo en cuenta que durante construcción se pueden presentar deficiencias que causen que el mortero no llegue a la altura deseada, es necesario estudiar la influencia de este fenómeno en el comportamiento del conjunto. Se consideraron 7 valores diferentes (desde 0 hasta 60 mm cada 10 mm) de altura libre de mortero. En último lugar, el parámetro de la alineación de las piezas es considerado en el estudio numérico. Se consideraron dos posibles alineaciones de piezas, alineadas o intercaladas. En la primera de ellas, las juntas tienen continuidad a lo largo de todas las piezas, mientras que, en la alineación intercalada, la junta no es continua (Ver Figura 2.4d).

En total se realizaron 20 simulaciones con las diferentes combinaciones de los parámetros descritos anteriormente. Para identificarlas se utilizaron tres identificadores alfanuméricos para cada modelo. El primero corresponde a la alineación de las piezas (A para alineadas o I para intercaladas), el segundo corresponde a la altura libre de mortero en cm, y el tercero corresponde al ángulo de inclinación de las caras laterales.

En la Tabla 3.2 se presenta una relación de los modelos realizados. Se realizaron una serie de optimizaciones para reducir el número de simulaciones requeridas.

Tabla 3.2 Relación de modelos realizados en el estudio numérico

Referencia	Alineación	Ángulo (°)	Altura libre (cm)
A_6_0	Alineada	0	6
A_6_7	Alineada	7	6
A_1_0	Alineada	0	1
A_1_7	Alineada	7	1
I_0_7	Intercalada	7	0
I_1_7	Intercalada	7	1
I_2_7	Intercalada	7	2
I_3_7	Intercalada	7	3
I_4_7	Intercalada	7	4
I_5_7	Intercalada	7	5
I_6_7	Intercalada	7	6
I_1_3.5	Intercalada	3.5	1
I_3_3.5	Intercalada	3.5	3
I_6_3.5	Intercalada	3.5	6
I_0_0	Intercalada	0	0
I_2_0	Intercalada	0	2
I_3_0	Intercalada	0	3
I_4_0	Intercalada	0	4
I_5_0	Intercalada	0	5
I_6_0	Intercalada	0	6

3.4 RESULTADOS

Los resultados se clasifican en cuando al comportamiento general del conjunto y en cuanto a la influencia de los parámetros mencionados en el apartado anterior.

3.4.1 Comportamiento general

Los resultados de las simulaciones realizadas muestran que las piezas no se caracterizan por presentar grandes deformaciones. Valores máximos de 0.01 mm fueron encontrados bajo las cargas aplicadas. Sin embargo, en algunos casos las tensiones si presentan valores altos. En la Figura 3.3 se muestra una deformada de la pieza central, así como las tensiones en dicha pieza y las tensiones en la interface.

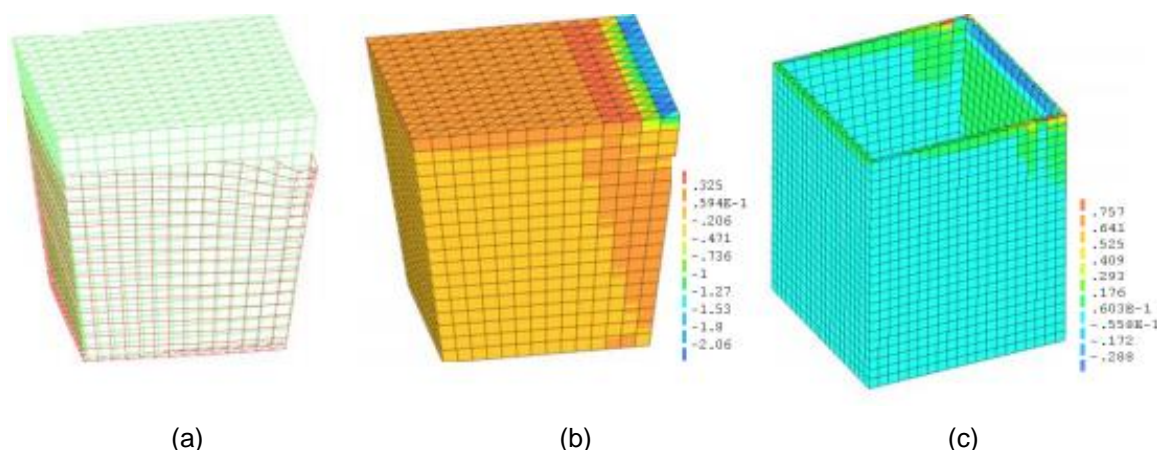


Figura 3.3 (a) Deformada de la pieza central: (b) Tensiones máximas dentro de la pieza: (c) Tensiones máximas en la interface del mortero

Los resultados mostrados en la Figura 3.3, son resultado de la tendencia de giro introducida por las cargas horizontales sobre las caras de las piezas. Debido a que esta solicitación corresponde a una carga orientada horizontalmente, es decir, en un plano paralelo a la cara superior de la pieza, se puede observar cómo se generan una serie de tensiones opuestas en la superficie de la pieza. Hacia el costado derecho de la pieza (Ver Figura 3.3b) se generan tensiones de compresión, mientras que hacia el costado izquierdo de la pieza se observan tensiones de tracción. Este fenómeno es como si la llanta del vehículo al frenar comprime el borde más cercano a la rueda mientras tracciona el borde opuesto. A medida que la llanta cruza la pieza las tensiones se moverán con ella.

3.4.2 Influencia de la altura libre de mortero

La evolución del factor de seguridad en función de la altura libre de mortero se muestra en la Figura 3.4, para piezas intercaladas e inclinación de caras laterales de 0° . En esta misma figura se muestra la misma información, pero para piezas con inclinación lateral de 7° . Las tres curvas observadas corresponden a los factores de seguridad de la pieza, del mortero y de la interface.

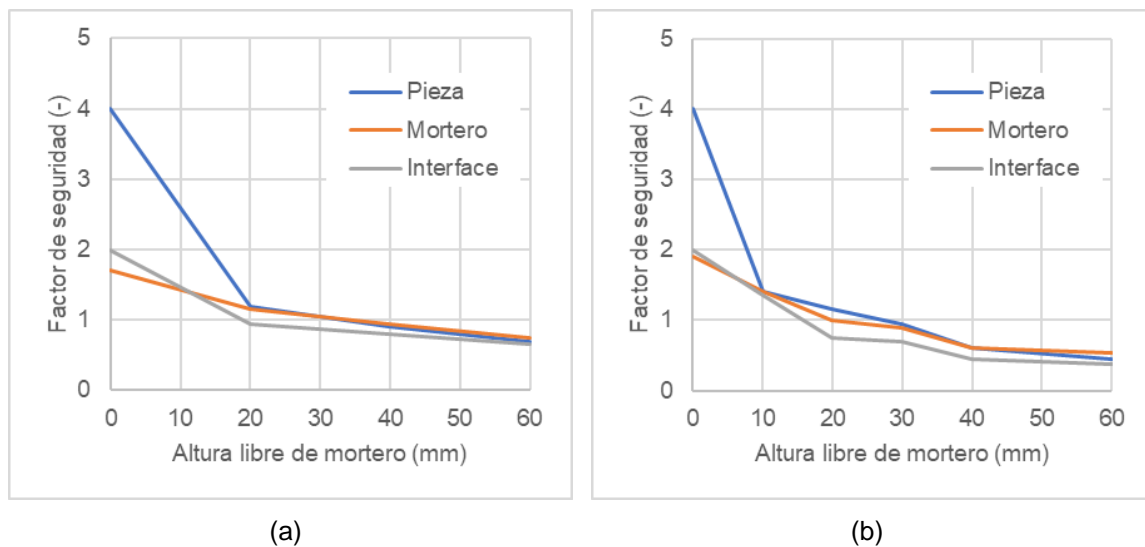


Figura 3.4 Influencia de la altura libre de mortero para modelos con piezas intercaladas e inclinación de caras laterales de (a) 0° y (b) 7°

En la Figura 3.4 se observa que para una altura libre de mortero de 10 mm o menos, los factores de seguridad encontrados siempre serán superiores a 1. Esto se observa en todos los componentes del conjunto. Una vez se disminuye la altura, los factores de seguridad se acercan peligrosamente al valor límite, y en el caso de la interfaz lo sobre pasa. Para una altura libre de mortero entre 30 y 40 mm todos los componentes del conjunto habrán presentado algún tipo de rotura o desprendimiento. Así mismo, tal y como sucede en situaciones reales de pavimento por piezas, el fallo de los mismo tiende a producirse en primer lugar en la interface y posteriormente en el mortero y la pieza.

A partir de esta información, se concluye que la correcta construcción del sistema es imprescindible para garantizar el correcto comportamiento de las piezas y del mortero. En otras palabras, es necesario garantizar la altura libre de 10 mm o menos durante construcción. Cualquier tipo de imperfección o deficiencia de llenado de juntas puede significar un aumento considerable en las tensiones dentro de la interface, por la reducción de área de adherencia, y por lo tanto puede causar algún tipo de fallo en el sistema.

3.4.3 Influencia de la inclinación de caras laterales

La Figura 3.5 muestra los factores de seguridad obtenidos para piezas con las tres diferentes inclinaciones evaluadas (0° , 3.5° y 7°). Se evaluaron dos alturas libres de mortero para cada caso, 10 y 60 mm.

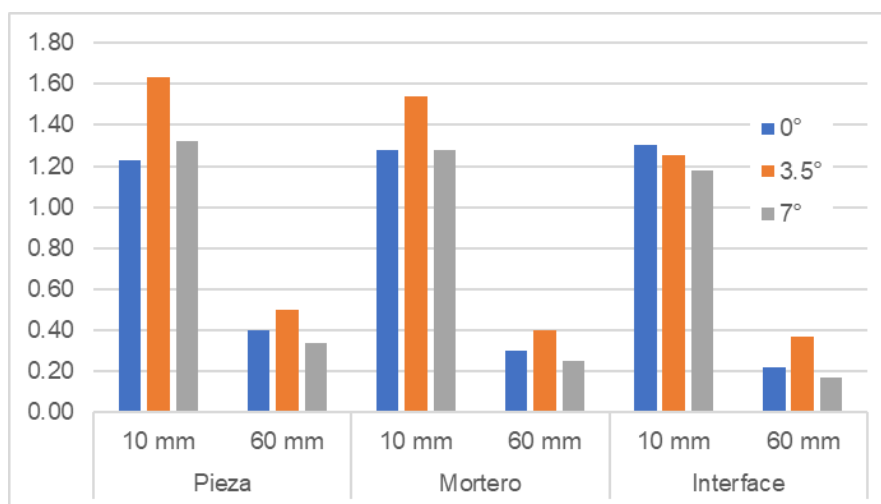


Figura 3.5 Influencia del ángulo lateral y altura libre de mortero en el factor de seguridad

En esta figura se observa que, al igual que en el apartado anterior, para una altura libre de mortero de 10 mm, todos los componentes del sistema presentan un factor de seguridad superior a 1, sin importar cuál sea la inclinación de sus caras laterales. Para la pieza de pavimento, el aumento del ángulo lateral se traduce en un aumento del factor de seguridad encontrado. Caso contrario a lo que sucede en el mortero y en la interface, donde el aumento del ángulo significa una reducción en dicho factor.

Este comportamiento se puede explicar por la mayor presencia de mortero en las piezas con ángulo mayor (mayor volumen entre piezas). Teniendo en cuenta que el mortero es un material más flexible que el que compone a las piezas, reduciendo así las tensiones internas en las piezas y aumentando el desplazamiento observado en el conjunto. De esta manera, los factores de seguridad se ven reducidos sobre el mortero y la interface cuando el ángulo de inclinación de las piezas aumenta.

Ahora bien, aunque en la Figura 3.5 se observa que las piezas que tienen un menor ángulo de inclinación de sus caras laterales, en algunos casos, presentan un

factor de seguridad mayor a la pieza que tiene sus lados a 7° , hay que tener en cuenta que a medida que dicha inclinación disminuye la probabilidad de alcanzar la altura deseada es menor. Esto significa que las piezas que tendrían inclinación de 0 y de $3,5^\circ$ difícilmente tendrán la altura libre de 10 mm que se les asignó en la simulación. Precisamente la inclinación de 7° diseñada de las piezas sirve para garantizar que se alcance una altura libre de mortero determinada, en este caso 10 mm.

3.4.4 Influencia en la alineación de las piezas

En último lugar, se realizó la comparación entre las dos alineaciones de piezas consideradas. En la Figura 3.6 se muestran los factores de seguridad para dichas alineaciones. Los resultados muestran que la alineación de las piezas no parece ser un factor determinante en el comportamiento mecánico del conjunto.

A partir de esta información se puede recomendar realizar los futuros estudios con una sola alineación de piezas. Debido al tamaño de las piezas, se recomienda la alineación alineada como alineación final.

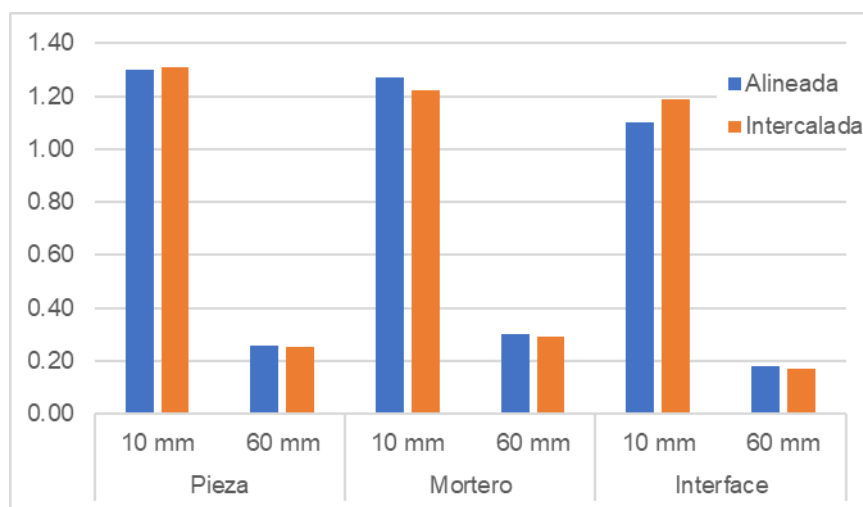


Figura 3.6 Factor de seguridad en función de la alineación de las piezas

3.5 CONCLUSIONES

El estudio numérico realizado permitió caracterizar el comportamiento estructural del conjunto compuesto por las nuevas piezas estudiadas. En primer lugar, se encontró que bajo las cargas vehiculare consideradas, la pieza central del conjunto no presenta tensiones superiores a las permitidas por el material. De igual manera, se

encontró que la carga horizontal, que simula la acción de frenado de los vehículos, genera una distribución no uniforme de tensiones a lo largo de la superficie de las piezas.

En cuanto al estudio paramétrico, en primer lugar, se encontró que una altura libre de mortero menor a 10 mm, garantiza el correcto comportamiento del sistema bajo las solicitaciones evaluadas. Cuando esta altura libre disminuye, el factor de seguridad asociado de cada uno de los componentes del conjunto disminuye considerablemente. Esta disminución puede significar el fallo del conjunto (rotura o desprendimiento de piezas).

En el caso de la inclinación de las caras laterales, se encontró que una inclinación menor se traduce, en general, en una resistencia del conjunto mayor. Sin embargo, teniendo en cuenta que la inclinación se hace para garantizar la altura libre de mortero, y que unas piezas con inclinación menor causan mayor dificultad en alcanzar dicha altura, se concluyó que las piezas con inclinación de 7° corresponden a la alternativa óptima.

En último lugar, el estudio paramétrico mostró que la alineación de las piezas no influye de manera directa en el comportamiento estructural. De acuerdo con esto, por razones estéticas se recomienda utilizar únicamente las piezas alineadas para futuros estudios.

4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN

En el Capítulo anterior se describió el estudio numérico realizado para el conjunto de piezas propuestas. No obstante, aunque este estudio simula el comportamiento estructural de dicho conjunto, el mismo no es capaz de considerar el proceso constructivo de las piezas, ni la ocurrencia de incidencias causadas por otros factores externos. Es por eso por lo que se decidió realizar una campaña experimental que fuera capaz de dar respuesta a los escenarios mencionados.

De acuerdo con esto, el objetivo de este capítulo es describir la campaña experimental ideada para simular el proceso constructivo de las piezas y evaluar la resistencia al arrancamiento de las piezas individuales.

Dentro del programa de pavimentos urbanos del Ajuntament de Barcleona, el cual está enfocado hacia el desarrollo de una nueva unidad que provea de nuevas funcionalidades al espacio público, mejorando así la calidad de vida de las personas, se han realizado estudios sobre un nuevo tipo de pavimento de bloques de hormigón.

A diferencia de los bloques convencionales utilizados en pavimentos, las nuevas piezas tienen una forma de pirámide truncada invertida, es decir, su cara inferior es un cuadrado y su cara superior es un cuadrado, pero de mayores dimensiones, por lo tanto, las aristas son líneas con una inclinación. En este caso específico la inclinación de los lados de la pieza es de 7° . La cara superior tiene lados de 95 mm. La altura de las piezas es de 120 mm o de 90 mm.

En la Figura 4.1 se presenta una sección de una pieza con altura de 120 mm. La geometría coincide con la considerada en el estudio numérico. Es importante mencionar que debido a las tolerancias consideradas durante su fabricación, sus medidas podrán presentar ligeras variaciones. Estas son despreciables.



Figura 4.1 Sección de las piezas estudiadas

4.2 FASE I: CONSISTENCIA DE MORTEROS

La fase previa a la realización de los ensayos de resistencia corresponde a la evaluación de diferentes tipos de mortero. La razón de esto determinar la consistencia óptima del mortero a utilizar durante la construcción de los pavimentos con este tipo de piezas, y su influencia en la resistencia del conjunto. A continuación, se describen los materiales utilizados en la elaboración de las mezclas.

4.2.1 Materiales

Cemento

Uno de los materiales más importante en la fabricación de un mortero es el cemento. Teniendo en cuenta que este determinará la resistencia de la mezcla, resulta crucial seleccionar el tipo de cemento adecuado.

El cemento que se utilizó en las mezclas es tipo Portland y su clase es CEM II/A-M (P-V) 42.5R. Este cemento fue fabricado de acuerdo con la norma UNE-EN 197-1:2011. Se seleccionó este tipo de cemento debido a su resistencia relativamente elevada (de un mortero patrón a 28 días como mínimo 42,50 MPa), considerando que en obra pública se espera se utilicen materiales de buena calidad.

Arena

El segundo componente de los morteros es el árido, en este caso, arena. Debido a que este componente afecta directamente la consistencia final de la mezcla, se optó por un árido que no tuviera granos demasiado grandes y que tuviera un contenido de finos relativamente bajo.

De acuerdo con esto, se eligió una arena uniforme con tamaño máximo de partícula de aproximadamente 0.40 mm, con una densidad seca de 2,59 g/ml y un porcentaje de finos de alrededor de 8,91%. En la Figura 4.2 se muestra la curva granulométrica de la arena utilizada para las mezclas de los morteros.

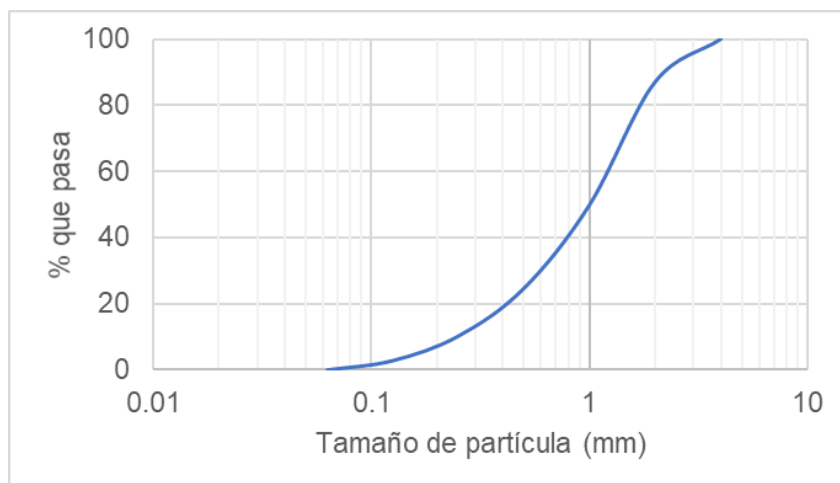


Figura 4.2 Curva granulométrica de la arena utilizada

Agua

El último componente de la mezcla es el agua. En este caso, sólo se debe cuidar que el líquido no tenga ningún tipo de contaminación o químico que pueda tener efectos secundarios sobre la mezcla final de mortero.

Se utilizó agua proveniente de la red de abastecimiento de la ciudad de Barcelona, la cual no se encuentra contaminada.

Piezas de adoquín

El último material utilizado durante la campaña experimental corresponde a las piezas de adoquín en sí. Estas no fueron fabricadas en el laboratorio, sino fueron suministradas por ESCOFET, una empresa basada en Barcelona que se especializa en la fabricación de elementos prefabricados de hormigón y piedra.

4.2.2 Dosificación

Para la dosificación de la mezcla, se parte de una primera dosificación base. Esta dosificación se presenta en la Tabla 4.1, y corresponde a la dosificación utilizada por el ayuntamiento en obras de pavimentos por bloques (Mortero M1).

Tabla 4.1 Diseño de mezcla 1 para la construcción de las muestras

Mortero	Cemento (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Agua (kg/m³)
M1	450	1350	225
M2	450	1350	248
M3	450	1350	270

A partir de este mortero, se diseñaron dos morteros más (M2 y M3 de la Tabla 4.1), uno ligeramente menos consistente (más trabajable), y otro considerablemente menos consistente (mucho más trabajable). A cada uno de los morteros preparados se le realizaron tres (3) ensayos de consistencia en la mesa de sacudidas, de acuerdo con la norma UNE-EN 1015-3:2000. En la Tabla 4.1 se muestran los diseños de mezcla para los dos morteros adicionales preparados.

Para mostrar los resultados obtenidos en los ensayos, se clasificarán los morteros con la letra M mayúscula y un número correspondiente al orden en el que se

describen los diseños de mezcla en este apartado. Es importante mencionar que se decidió mantener la misma relación de cemento y arena (1:3) ya que ésta es la que se usa actualmente en obras del tipo.

Ahora bien, durante la Fase II de la campaña experimental, que se describe en el siguiente apartado, se realizará un ensayo de consistencia por cada amasada realizada para la preparación de las muestras. Esto con el objetivo de verificar que la dosificación utilizada es la correcta.

4.3 FASE II: ENSAYOS DE RESISTENCIA EN CONJUNTO

4.3.1 Preparación de muestras

Un de los objetivos de esta campaña experimental es evaluar el comportamiento de la interfaz pieza mortero. Esto se hace con el objetivo de caracterizar el comportamiento en una situación real de la estructura propuesta. Se intentó recrear la construcción real de estas piezas a través de la construcción de un marco de 350*350*150 mm, dentro del cual se dispuso una cama de mortero y se ubicaron los bloques de hormigón de tal manera que el mortero se distribuyera a lo largo las caras laterales e inferiores de los mismos. Dentro de cada marco se hincaron 9 piezas de pavimento. En la Figura 4.3 se muestra un arreglo general de los marcos elaborados.



Figura 4.3 Muestras utilizadas para los ensayos de arrancamiento

Durante la etapa de construcción de los marcos, se propusieron dos métodos constructivos diferentes. El primero de ellos se calificó como método manual, y el otro como método industrial, de acuerdo con las características inherentes de cada uno de ellos. A continuación, se describen las dos alternativas evaluadas.

1. **Método manual:** El primer método fue concebido considerando la puesta en obra de las piezas a menor escala ya que el tiempo que toma la utilización de este método puede ser mayor en comparación con el método industrial. La colocación manual de las piezas comenzará con una cama de mortero, en este estudio se eligió una altura de 2 cm. Posteriormente se dispone mortero sobre una sección de las paredes y se ubica la primera pieza. Para la segunda pieza, se dispondrá mortero sobre la pared de la primera pieza y sobre la pared de la segunda pieza que se requiera fijar. Se ubica la segunda pieza, asegurando una separación de aproximadamente 5 mm con la otra pieza. Para las demás piezas se sigue el mismo método. Este método guarda cierta similitud con la construcción de muros de mampostería (sólo que en un plano diferente).
2. **Método industrial:** Este método tiene una complejidad menor al presentado anteriormente. En este caso se debe calcular previamente el volumen de mortero requerido para la construcción de las piezas. Este volumen se introduce, en este caso en los marcos, en su totalidad. Posteriormente se introduce la primera pieza hasta dejar una altura libre de aproximadamente 1 cm. Se procede a introducir el resto de las piezas una por una, guardando la separación de 5 mm entre piezas y cuidando que las piezas que ya están ubicadas no modifiquen su posición.

La utilización de uno de los dos métodos propuestos dependerá principalmente de la trabajabilidad o fluidez del mortero. Según esto, entonces, para aquel mortero que sea más seco, se utilizará el método manual, mientras que para cualquier mortero que presente una fluidez alta, se utilizará preferiblemente el método industrial.

4.3.2 Ensayos sobre muestras

El ensayo que se realizó para medir la resistencia de la interfaz mortero-pieza fue un ensayo de pullout o arrancamiento. Para este ensayo se utilizó el equipo Hilti

Anchor Tester (HAT) 28M. Este equipo tiene un rango máximo de fuerza de 0 a 25 kN, con un recorrido de pistón de 50 mm (Hilti Corporation, 2012).

Mediante el apoyo sobre las demás piezas de la muestra, se puede aplicar una fuerza vertical que busque arrancar la pieza central. A la pieza central se le fijó una platina metálica con un agujero que permite anclar la máquina que aplica la fuerza (Ver Figura 4.4b). El montaje experimental se observa en la Figura 4.4a. Los ensayos se realizaron con una edad del mortero de 7 días. Teniendo en cuenta que, en una situación de la vida real, no se puede garantizar el curado del mortero por un tiempo muy prolongado (debido a la necesidad de realizar las obras públicas lo más rápido posible), el tiempo elegido se considera similar al experimentado durante la construcción.



(a)



(b)

Figura 4.4 (a) Montaje experimental para ensayo de arrancamiento. (b) Pieza adherida a los bloques

En fases iniciales se tenía planeado ensayar 3 muestras para cada tipo de mortero, sin embargo, en fases posteriores se redujo el número de mortero a 2, por lo tanto, se ensayaron 6 muestras con la metodología descrita. El esquema para identificar las piezas en el resto del documento es MX_Z , donde: MX corresponde al tipo de mortero (1, 2 o 3) y Z corresponde al número de muestras (1, 2 o 3). Entonces, por ejemplo, la muestra M2_1 corresponde a la muestra 1 elaborada con el mortero 2.

4.4 FASE III: ENSAYOS DE RESISTENCIA INDIVIDUALES

Adicional al estudio de la resistencia de la interfaz mortero-pieza, se buscó obtener una caracterización simple de las propiedades mecánicas de las piezas individuales. Se ensayaron las piezas a compresión, con un proceso similar al descrito en la norma UNE-EN 12390-3:2009 (AENOR, 2009). También se realizaron ensayos de tracción indirecta con un proceso parecido al descrito en la norma UNE-EN 12390-6:2010 (AENOR, 2010). Las variaciones encontradas entre los procesos descritos en las normas y los aplicados en esta campaña experimental se deben a la forma no estándar de las probetas utilizadas.

En la Figura 4.5 se presentan los montajes utilizados en los dos ensayos mencionados. Se ensayaron cinco (5) muestras en cada caso, por lo tanto, para identificarlas se utilizará la una letra, C o B para compresión o tracción (brasileño), y un número. Teniendo en cuenta el tiempo desde la recepción de las piezas, se estima que la edad del hormigón es mayor a 28 días.

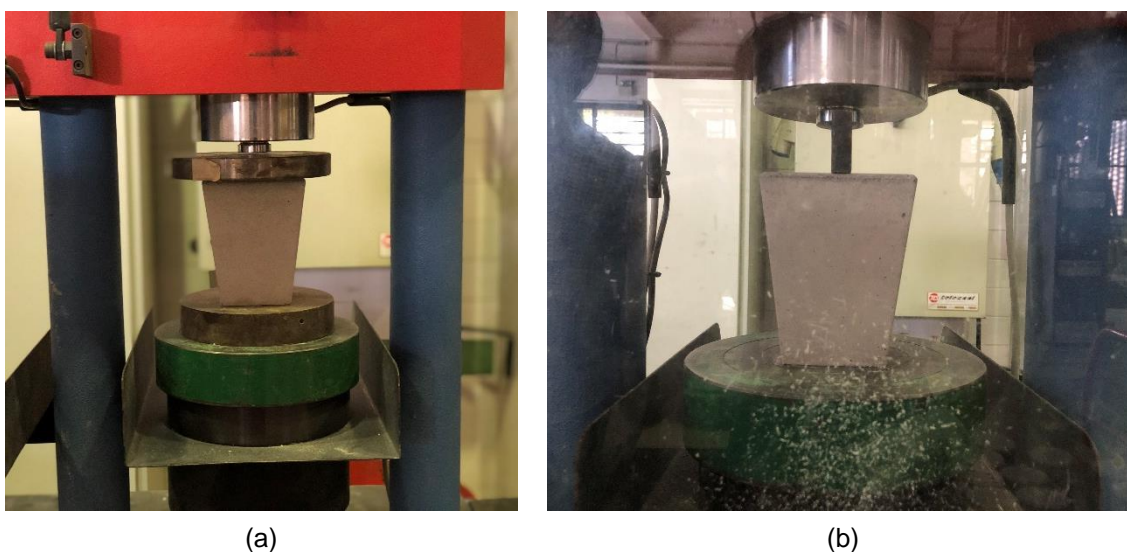


Figura 4.5 Montaje experimental para (a) ensayo de compresión. (b) ensayo de tracción indirecta (brasileño)

5. RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la campaña experimental planeada en el apartado anterior, se procedió a realizar los ensayos descritos. El objetivo de este capítulo es mostrar los resultados obtenidos para dichos ensayos, así como al análisis de los mismos; el cual se hace para cada una de las fases, anteriormente presentadas.

5.2 FASE I: CONSISTENCIA DE MORTEROS

Como se describió en el Capítulo 4.2, la campaña experimental se inició con las pruebas sobre los morteros a utilizar. Se decidió mantener constante una relación cemento: arena de 1:3, mientras que se ensayaron diferentes relaciones agua/cemento. Esto se hizo con el objetivo de que la trabajabilidad del mortero fuera una variable en los ensayos posteriores. De acuerdo con esto se realizaron tres ensayos de consistencia en la mesa de sacudidas para cada mortero. De acuerdo con la norma UNE-EN 1015-3:2000, el valor del escurrimiento del mortero es el promedio

de los valores medidos, si estos valores no presentan una diferencia mayor al 10%, en caso de que la diferencia sea mayor, el ensayo debe ser repetido.

A partir de los valores de escurrimiento, cada mortero puede ser clasificado en una categoría de acuerdo con su fluidez. Los morteros con valores de escurrimientos bajos serán morteros secos, mientras que aquellos con valores altos serán mortero fluidos. Los morteros que se encuentren entre estas dos clasificaciones se denominan morteros plásticos (Gutiérrez, 2003). En la Tabla 5.1 Clasificación de morteros de acuerdo con su consistencia (Gutiérrez, 2003) se presenta esta clasificación; mientras que en la Tabla 5.2 se presentan los valores de escurrimiento obtenidos para los morteros ensayados.

Tabla 5.1 Clasificación de morteros de acuerdo con su consistencia (Gutiérrez, 2003)

Consistencia	Escurrecimiento (mm)	Fluidez (%)
Dura (seca)	< 140	80 - 100
Media (plástica)	140 - 200	100 - 120
Fluida (húmeda)	> 200	120 - 150

Tabla 5.2 Resultados ensayos de consistencia sobre morteros frescos

Mortero	Medida 1 (cm)	Medida 2 (cm)	Medida 3 (cm)
M1	15,45	15,20	14,90
M2	19,10	18,70	18,80
M3	21,10	21,15	21,00

De acuerdo con la Tabla 5.2, el mortero 1 (M1) y el mortero 2 (M2) se clasifican como morteros plásticos, mientras que el mortero 3 (M3) corresponde a un mortero fluido. Ahora bien, aunque el mortero 1 y el mortero 2 sean clasificados como plásticos, la diferencia entre su trabajabilidad es considerable, con una diferencia en fluidez cercana a un 20%. Esto podría indicar que la relación a/c de 0.50 es ligeramente menor a la requerida por la dosificación para recubrir toda la superficie de los áridos en pasta de cemento. Esto se traduce en una mayor resistencia, pero en una trabajabilidad menor. De igual manera, a pesar de que el mortero 3 y el mortero 2 no compartan la misma clasificación, su consistencia es más parecida entre sí, en comparación con el mortero 1.

En esta etapa del estudio se decidió eliminar uno de los morteros propuestos. El mortero 2 no será utilizado para la construcción de los marcos. Debido a que los morteros 1 y 2 presentan la misma clasificación de trabajabilidad, y que el mortero 2 y 3 presentan una trabajabilidad similar, de acuerdo con lo descrito previamente, parece redundante seguir considerando el mortero 2 como una alternativa relevante para los objetivos de este estudio. Por lo tanto, los morteros que serán utilizados para la construcción de los marcos serán los morteros 1 y 3 de consistencia plástica y fluida, respectivamente.

A partir de esta información, se determinó que el mortero 1 será utilizado con el método constructivo clasificado como “método manual”, y el mortero 3 será utilizado con el “método industrial”.

5.3 FASE II: ENSAYOS DE RESISTENCIA EN CONJUNTO

Para poder caracterizar el comportamiento de la interfaz mortero pieza, y su adherencia, en esta fase de desarrollo del proyecto investigativo se buscó realizar el ensayo de arrancamiento descrito el Capítulo 4.3.

5.3.1 Preparación de muestras

En la elaboración de los marcos se consideraron dos tipos de mortero diferente. El mortero 1, se caracteriza por tener una trabajabilidad media, y el mortero 3, cuya trabajabilidad es alta. Así mismo, el método constructivo utilizado con el mortero 1 corresponde al método manual (ver Figura 5.1). Por otro lado, con el mortero 3 se utilizó el método industrial de construcción.

Durante la construcción de los marcos, se encontró que el método manual resultaba en una complejidad superior, ya que, al requerir disponer mortero sobre las piezas, y dado que la superficie de estas era muy lisa, no era posible garantizar la obtención de la altura libre determinada durante planeación (1 cm). Esto se traduce en una superficie de anclaje reducida, en comparación con la esperada. Por cuestiones de acabados, tampoco era posible rellenar las juntas con mortero una vez las piezas hubieran sido ubicadas.



Figura 5.1 Construcción de los marcos utilizando el método manual con el mortero 1

En el caso del método constructivo industrial, aunque la colocación de las piezas era más sencilla, la dificultad radicaba en garantizar la separación entre piezas. Dado que el mortero 3 tenía una consistencia más líquida, la introducción de las piezas hasta la altura deseada no requería mucha presión externa, sin embargo, esto significaba que, al introducir una nueva pieza, las demás piezas que ya se encontraban dentro del mortero sufrían un desplazamiento causado por el aumento de presión. Adicionalmente, una vez todas las piezas se encontraban introducidas, era necesario utilizar una placa y unos golpes de martillo para nivelar el conjunto.

En la Figura 5.2 se muestra un marco construido con cada uno de los dos métodos analizados.



(a)



(b)

Figura 5.2 Marcos construidos con (a) método manual; (b) método industrial

Es posible observar que el método manual tiene una simetría ligeramente mayor al método industrial, mientras que el acabado superficial es superior. Ahora bien, es posible obtener resultados similares utilizando el método industrial mediante la utilización de equipos más avanzados durante fase de obra. Esto teniendo en cuenta que el método manual requiere un tiempo mucho mayor para lograr el acabado observado en la Figura 5.2. De acuerdo con lo descrito en el Capítulo 4.3, se dejó un tiempo de secado de 7 días para cada uno de los marcos elaborados. Una vez se cumplió el plazo, se procedió a la preparación para el ensayo de arrancamiento.

5.3.2 Ensayo de arrancamiento

Para el ensayo de arrancamiento concebido en fases de planeación se preparó el montaje mostrado en la Figura 5.3a. Se preparó una platina metálica para soportar el componente de tiro vertical. Esta platina metálica fue anclada químicamente mediante el adhesivo X60, el cual es un adhesivo de dos componentes, uno líquido y otro en polvo, y de rápido secado.



Figura 5.3 (a) Montaje experimental para el ensayo de tiro; (b) Adhesivo utilizado para anclar la platina metálica a la pieza

Una vez el adhesivo hubiera secado (alrededor de 1 hora) se procedió a realizar el ensayo de tiro. En este punto no fue posible completar el ensayo de arrancamiento de las piezas. Se observó un fenómeno en el cual la cohesión interna del material de la pieza era inferior a la resistencia del adhesivo. Según esto,

entonces, al aplicar una fuerza de tiro de aproximadamente 9 kN, se logra despegar la platina metálica con el adhesivo, llevándose consigo una delgada capa de material de la pieza (Ver Figura 5.4a).

En este punto se consideró la posibilidad de que las piezas pudieran tener algún defecto de fabricación que causara que sus capas exteriores tuvieran una menor resistencia. Por lo tanto, se decidió realizar un nuevo intento. Esta vez, se adicionó una mayor cantidad de adhesivo X60 sobre la capa descubierta de la pieza, la cual contaba con una rugosidad considerablemente mayor. Sin embargo, se obtuvo el mismo resultado. Alrededor de una acción de 9 kN se despegó la platina, llevándose consigo otra fina capa de componente de las piezas. Debido a estos resultados se descartó el uso de la platina metálica en el ensayo.



(a)



(b)

Figura 5.4 (a) Resultados del primer ensayo de tiro; (b) Adición de resina X60 sobre capa más rugosa

El siguiente sistema considerado para lograr realizar el ensayo de tiro fue el uso de un taco metálico (de tamaño métrico 12) y un tornillo. En este sistema se debe realizar un agujero en el centro de la pieza e introducir el taco, posteriormente se atornilla la pieza central lo que se encarga de expandir el taco. En esta etapa se saca el tornillo utilizado y se introduce un esparrago del mismo tamaño al cual se le adapta una pieza de la cual se puede tirar mediante la máquina destinada para este fin (Ver Figura 5.5).

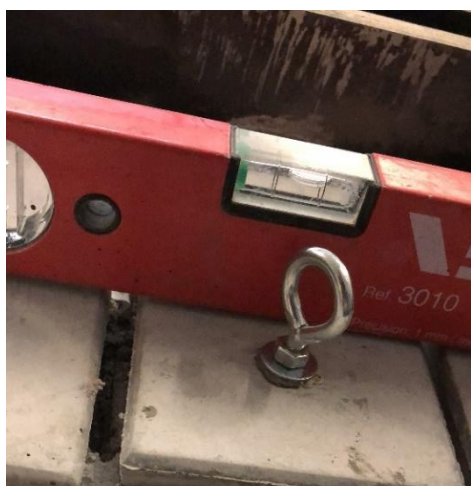


Figura 5.5 Taco metálico utilizado y arreglo final de alternativa

Con una fuerza cercana a los 11 kN la máquina de tiro empezó a extraer el taco metálico introducido, sin que la pieza de adoquín se desplazara. De acuerdo con esto, este método de anclaje mecánico también fue descartado y no puede ser utilizado para medir la fuerza necesaria para arrancar la pieza.

Como solución final para extraer las piezas de adoquín, se utilizó una mezcla de anclaje mecánico y químico. Su funcionamiento es similar al del anclaje mecánico descrito anteriormente, sin embargo, antes de introducir el taco, se rellenó el agujero con el adhesivo X60. Ahora bien, durante la preparación del sistema, se encontró que el X60 en estado líquido actúa como lubricante, impidiendo que el taco se expandiera lo suficiente. La terminación de este sistema es un gancho de acero inoxidable soldado (Ver Figura 5.6).

Una vez el adhesivo estuviera seco (aproximadamente 1 hora) se realizó el ensayo de tiro. En este caso, el sistema de anclaje fue lo suficientemente resistente, sin embargo, la adherencia entre las piezas y el mortero resulta ser mayor de lo esperado, por lo tanto, la máquina de tiro alcanzó su límite de actuación antes de arrancar la pieza. Se alcanzó una fuerza de tiro de 25 kN, equivalente a 2,50 ton de fuerza.



(a)



(b)

Figura 5.6 (a) Sistema de anclaje mecánico y químico utilizado; (b) Resultados de ensayo con el sistema descrito

5.3.3 Cálculo teórico de fuerza de arrancamiento

Dado que no fue posible determinar la resistencia mediante el método descrito durante la fase experimental, se procede a realizar un cálculo rápido para determinar la magnitud de la fuerza requerida para arrancar las piezas. Para cada marco se midió la altura libre en cada uno de sus lados. A partir de esta altura y asumiendo que su base se encuentra adherida en su totalidad, es posible calcular el área adherida de todas las piezas. En la Tabla 5.3 se muestran las medidas y el área mencionada para cada pieza.

Tabla 5.3 Alturas y áreas adheridas para las muestras

Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Área adherida (mm ²)
M1_1	25.5	39.7	63.1	35.9	28083
M1_2	80.6	43.3	79.4	40.3	21642
M1_3	37.7	46.3	38.8	56.4	26757
M3_1	28.1	26.1	14.1	16.3	34936
M3_2	30.3	30.9	31.1	20.4	32439
M3_3	31.6	35	24.4	25.5	32106

Para ciertos tipos de mortero estándar es posible encontrar un valor mínimo de adherencia. En el caso del mortero tipo M, el cual tiene una dosificación similar a la

dosificación utilizada en este estudio, su adherencia debe ser como mínimo 0,80 MPa (Portland Cement Association, 2002). Para tener una idea de la fuerza de adherencia de los morteros utilizado, se empleará este valor.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.4. En la misma, en primer lugar, se observa claramente que el mortero más fluido (mortero 3) presenta áreas de adherencia mayores que el mortero 1. Esto se debe, como se mencionó anteriormente, al método constructivo. Ahora bien, los valores de fuerza obtenidos se encuentran cercanos al valor mínimo obtenido durante la campaña experimental, el cual fue de 25 kN. No obstante, hay que considerar que la dosificación del mortero tipo M, aunque similar a la de los morteros empleados en este estudio, contiene una parte más de arena, y un cuarto de cal (dosificación 1/0.25/4). Esto se traduce en mayor cantidad de sólidos, por lo tanto, el cemento tendrá una mayor área que hidratar, lo que podría causar una menor adherencia con las piezas.

Tabla 5.4 Fuerzas de adherencias calculadas

Probeta	Área adherida (m ²)	Fuerza (kN)
M1_1	0.028	22.47
M1_2	0.022	17.31
M1_3	0.027	21.41
M3_1	0.035	27.95
M3_2	0.032	25.95
M3_3	0.032	25.68

La información presentada en la Tabla 5.4 da una idea del orden de magnitud de la resistencia al arrancamiento esperada para las mezclas utilizadas en este estudio. No obstante, para poder medir dichas resistencias con exactitud, es necesario utilizar un montaje experimental diferente al considerado durante la campaña experimental.

5.3.4 Consideraciones adicionales

Para poder dar un juicio de valor sobre los morteros ensayados y sobre las piezas estudiadas se diseñó un sistema de criterios basados en la experiencia durante

la construcción de las muestras en la campaña experimental. Los criterios considerados fueron los siguientes:

- **Facilidad constructiva:** Este criterio se refiere concretamente al método constructivo utilizado. Con este resultado será posible determinar cuál de los métodos empleados es el más óptimo para las condiciones disponibles.
- **Puesta en funcionamiento:** En este caso, se busca determinar las fuerzas y debilidades de los métodos (y las mezclas) en cuanto a su ejecución en obra.
- **Materiales:** La forma en la que se utilizan los diferentes materiales influirá en la viabilidad de las opciones consideradas.
- **Comportamiento estructural:** En último lugar, se consideró el comportamiento estructural de las mezclas empleadas, ya que, si fuera posible contar con un valor único de resistencia al arrancamiento, se trataría de un factor importante a estudiar.

Para cada uno de los criterios presentados, se encontraron una serie de indicadores que determinarán la valoración de las alternativas. En la Tabla 5.5 se presenta una breve descripción de los indicadores utilizados en esta evaluación.

Teniendo en cuenta que la dosificación de los morteros utilizados es similar, algunos de los indicadores presentados en la Tabla 5.5 (como el indicador “Cantidad”), tendrán el mismo valor para ambos casos. Así mismo, el criterio de comportamiento estructural tendrá un valor similar entre las dos alternativas. Teniendo en cuenta que no fue posible determinar un valor único de resistencia al arrancamiento, sino un umbral mínimo, el cual es el mismo para las dos mezclas y se considera adecuado, el valor del dicho indicador será el máximo. Ahora bien, teniendo en cuenta que se trata de un estudio sencillo de valoración de alternativas, no se emplearán funciones de valor en los indicadores, en cambio, se utilizará un sistema de clasificación de tres niveles (0, 0.5 y 1) basado en la experiencia durante construcción.

Tabla 5.5 Indicadores utilizados para valoración de alternativas

Criterio	Indicadores	Descripción
Facilidad constructiva	Colocación de piezas	La facilidad con la que se introducen las piezas en la mezcla.
	Alineación de piezas	La facilidad con la que se logra la alineación deseada de las piezas.
	Altura libre	Qué tan fácil el método constructivo y la mezcla alcanzan la altura de cobertura requerida.
	Nivelación	Que tan fácil se permite la nivelación de todas las piezas.
Puesta en funcionamiento	Tiempo de endurecimiento	El tiempo que requiere la mezcla para llegar a una resistencia aceptable.
	Durabilidad de geometría	Durante cuanto tiempo la geometría construida es modificable.
	Tiempo de ejecución	El tiempo que toma ubicar las piezas dentro de la mezcla.
	Rellenado de juntas	Una vez se tienen todas las piezas, si es necesario rellenar las juntas.
	Residuos en superficie	Qué tan fácil es obtener residuos de mortero en la superficie de las piezas.
Materiales	Cantidad (dosificación)	La cantidad de materiales requeridos para realizar la mezcla.
	Desperdicio	Los desperdicios generados durante la construcción.
Comportamiento estructural	Adherencia	Qué tan fácil se adhiere la mezcla en estado húmedo a las piezas.
	Resistencia al arrancamiento	El valor de resistencia al arrancamiento.

Así mismo, los pesos de dichos indicadores y de los criterios, serán uniformes, es decir, serán los mismos dentro de cada categoría. Por ejemplo, el criterio “Facilidad constructiva” tiene 4 indicadores, por lo tanto, el peso de cada uno de ellos será de 0,25. La alternativa 1 corresponde al mortero 1 construido con método manual, mientras que la alternativa 2 corresponde al mortero 3 construido con el método industrial.

En la Tabla 5.6 y en la Tabla 5.7 se presentan los valores de los indicadores y de los criterios, respectivamente. De acuerdo con la información presentada en la Tabla 5.7, el estudio realizado da como resultado que la alternativa 2, es decir, la

alternativa del mortero 3 (menor consistencia) y el método de construcción industrial, es la alternativa más viable bajo con criterios analizados.

Se puede observar que la mayor diferencia está en el criterio de facilidad constructiva donde el valor ponderado es casi 3 veces mayor. Esto refleja lo observado durante la campaña experimental, donde el método constructivo industrial resultó ser mucho más sencillo y más rápido a la hora de construir los marcos. Es importante mencionar que, dado que los valores de los indicadores se asignaron sin funciones de valor, los resultados obtenidos en este estudio reflejan una experiencia personal, que puede ser modificada por medio de la utilización de otras herramientas o conocimientos constructivos.

Tabla 5.6 Valores obtenidos para los indicadores de las dos alternativas

Criterio	Indicadores	Alternativa 1		Alternativa 2	
		Valor	Valor ponderado	Valor	Valor ponderado
Facilidad constructiva	Colocación de piezas	0.50	0.125	1.00	0.250
	Alineación de piezas	0.50	0.125	0.50	0.125
	Altura libre	0.00	0.000	1.00	0.250
	Nivelación	0.00	0.000	0.50	0.125
Puesta en funcionamiento	Tiempo endurecimiento	1.00	0.200	0.00	0.000
	Durabilidad de geometría	1.00	0.200	0.50	0.100
	Tiempo de ejecución	0.00	0.000	1.00	0.200
	Rellenado de juntas	0.00	0.000	1.00	0.200
	Residuos en superficie	1.00	0.200	0.50	0.100
Materiales	Cantidad (dosificación)	0.50	0.250	0.50	0.250
	Desperdicio	0.50	0.250	1.00	0.500
Comportamiento estructural	Adherencia	0.50	0.250	0.00	0.000
	Resistencia arrancamiento	1.00	0.500	1.00	0.500

Tabla 5.7 Valores obtenidos para los criterios de las dos alternativas

Criterio	Alternativa 1		Alternativa 2	
	Valor	Valor ponderado	Valor	Valor ponderado
Facilidad constructiva	0.250	0.0625	0.750	0.1875
Puesta en funcionamiento	0.600	0.1500	0.600	0.1500
Materiales	0.500	0.1250	0.750	0.1875
Comportamiento estructural	0.750	0.1875	0.500	0.1250
Total		0.53		0.65

5.4 FASE III: ENSAYOS DE RESISTENCIA INDIVIDUALES

Durante esta fase, se busca tener una noción de la resistencia de las piezas. Se espera que el conjunto falle antes de que alguna de sus componentes individuales lo haga primero. Por lo tanto, es necesario conocer la resistencia de las piezas bajo diferentes sollicitaciones. Dentro del alcance del presente documento, se consideraron dos esfuerzos importantes a los que las piezas pueden estar sometidas, la resistencia a la compresión y a la tracción.

5.4.1 Resistencia a la compresión

Como se describió en el Capítulo 4.4, para evaluar la resistencia a la compresión se utilizó un ensayo de compresión normalizado. A cada pieza se le midieron las dimensiones y su peso, previamente a realizar el ensayo. En la Tabla 5.8 se hace la relación de las piezas ensayadas con sus propiedades geométricas y su peso. El denominado “Lado 1” corresponde a su cara de mayor área (superior) y el denominado “Lado 2” corresponde a su cara de menor área (inferior).

Para cada muestra se anotó la carga máxima de rotura, y se registraron los datos de carga y recorrido del pistón durante todo el ensayo. Como es de esperarse, todas las muestras fallaron de una manera similar. En la Figura 5.7 se muestra una de las probetas ensayadas hasta su rotura. Debido a la forma de las piezas, la resistencia a compresión está limitada por la cara de menor área. En la Figura 5.7 se observa que la rotura superficial se dio por una línea que coincide con la cara inferior de la pieza. Así mismo, dentro de la pieza se encontró el plano de rotura diagonal, encontrado normalmente en probetas prismáticas.

Tabla 5.8 Propiedades geométricas y peso de las muestras ensayadas a compresión

Probeta	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)
C1	9,42	6,68	11,98	2,13
C2	9,44	6,60	12,03	2,03
C3	9,52	6,65	11,95	2,08
C4	9,46	6,64	11,97	2,03
C5	9,43	6,59	11,95	2,09



Figura 5.7 Probeta fallada bajo carga de compresión.

Según lo anterior, se determinó que, bajo carga de compresión, la pieza se comporta como una pieza prismática con las dimensiones de la cara inferior. De acuerdo con la norma UNE-EN 12390-3:2009, la resistencia a compresión viene dada por la Ecuación 5.1.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

donde: f_c es la resistencia a compresión en MPa (N/mm²);

F es la carga máxima de rotura en N;

A_c es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión en mm².

A partir de esta información, con la ecuación Ecuación 5.1 es posible calcular la resistencia a compresión de cada muestra. Esta resistencia se muestra en la Tabla 5.9. Los valores obtenidos para la resistencia a compresión de las diferentes muestras son muy similares. Para la serie de datos obtenidos, la resistencia a compresión promedio es de 38,22 MPa, con una desviación estándar de 1,82 MPa. Teniendo en cuenta que la desviación estándar representa una variación de aproximadamente 4%, se podría considerar el valor promedio obtenido como la resistencia a compresión de las piezas

Tabla 5.9 Resistencia a la compresión de las muestras

Probeta	Área (mm ²)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)
C1	4456	162730	36,52
C2	4349	157570	36,23
C3	4416	179130	40,57
C4	4409	170320	38,63
C5	4343	169930	39,13

5.4.2 Resistencia a la tracción

Ahora bien, para determinar la resistencia a la tracción de las piezas, de acuerdo con lo descrito en el Capítulo 4.4, se preparó un ensayo brasileño modificado. De acuerdo con la norma UNE-EN 12390-6:2009, el ensayo brasileño se realiza aplicando una carga a compresión sobre un plano perpendicular al plano en el que se quiere medir la tracción. Esta carga genera una tracción sobre las muestras ensayadas.

En esta investigación se consideró realizar este ensayo de la misma manera, sin embargo, se llegó a la conclusión que una carga de tracción sobre el plano paralelo a la cara superior de la pieza no se podría presentar en una situación de la vida real. Entonces, considerando que las piezas estarán sometidas al paso de vehículo, las llantas aplicarán una fuerza paralela a la cara superior de la pieza, por lo tanto, se llegó a la conclusión de esa es la resistencia a tracción que debería ser estudiada.

Al igual que para los ensayos de compresión, a cada pieza se le tomaron sus dimensiones y se registró su peso. En la Tabla 5.10 se presenta la relación de las piezas ensayadas con sus propiedades geométricas y su peso. El denominado “Lado 1” corresponde a su cara de mayor área (superior) y el denominado “Lado 2” corresponde a su cara de menor área (inferior).

Para cada una de las muestras se registró la carga máxima de rotura. En este caso no se registraron los datos de carga y recorrido del pistón, ya que para este ensayo estos resultados carecen de sentido. En estos ensayos, la falla se produjo con una grieta ubicada en el punto de aplicación de la carga y con inclinación nula. Este

tipo de falla es similar al que se observa en un ensayo brasileño común. En la Figura 5.8 se muestra una de las piezas ensayadas.

Tabla 5.10 Propiedades geométricas y peso de las muestras ensayadas a tracción

Probeta	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)
B1	9,43	6,72	12,01	2,03
B2	9,42	6,65	12,04	2,06
B3	9,42	6,60	11,92	2,05
B4	9,42	6,59	11,95	2,07
B5	9,43	6,61	12,01	2,04



Figura 5.8 Probeta rota a tracción mediante el ensayo Barcelona.

En la Figura 5.9 se muestran los gráficos de fuerza contra recorrido del pistón. El pico máximo de carga corresponde a la carga máxima de rotura para cada probeta. En general, se observa que las gráficas tienen la forma típica de un ensayo sobre hormigón en masa. Esto significa que las piezas están fabricadas de un material frágil. La descarga observada en alguna de las gráficas se debe a la detección de rotura que tiene el sistema de ensayo. En todos los casos se observa que la pendiente de la zona elástica es muy similar. Es importante mencionar que la concavidad de las curvas es causada por las fases iniciales de carga, donde el pistón debe recorrer una distancia antes de iniciar la aplicación de la carga.

Para la determinación de la resistencia a tracción se utilizará la Ecuación 5.2, presentada en la Norma UNE-EN 12390-6:2009.

$$f_{ct} = \frac{2*F}{\pi*L*d}$$

Ecuación 5.2

donde: f_{ct} es la resistencia a tracción indirecta en MPa (N/mm²);

F es la carga máxima en N;

L es la longitud de la línea de contacto de la probeta en mm;

d es la dimensión de la sección transversal (altura) en mm.

De acuerdo con esta información, es posible calcular la resistencia a tracción indirecta de cada muestra ensayada. Las resistencias encontradas se presentan en la Tabla 5.11. La resistencia a tracción promedio para las piezas fue de 3,13 MPa, con una desviación estándar de 0,45 MPa. Aunque la variación encontrada en estos ensayos es mayor a la encontrada en los ensayos de compresión, el valor obtenido es aceptable, por lo tanto, se tomará el valor promedio para la resistencia a tracción de todas las piezas.

Tabla 5.11 Resistencia a la tracción de las muestras

Probeta	L (mm)	d (mm)	Fuerza (N)	Tensión (MPa)
B1	94,25	120,10	52965	2,98
B2	94,20	120,40	62760	3,52
B3	94,15	119,20	64980	3,69
B4	94,20	119,50	47578	2,69
B5	94,30	120,10	49132	2,76

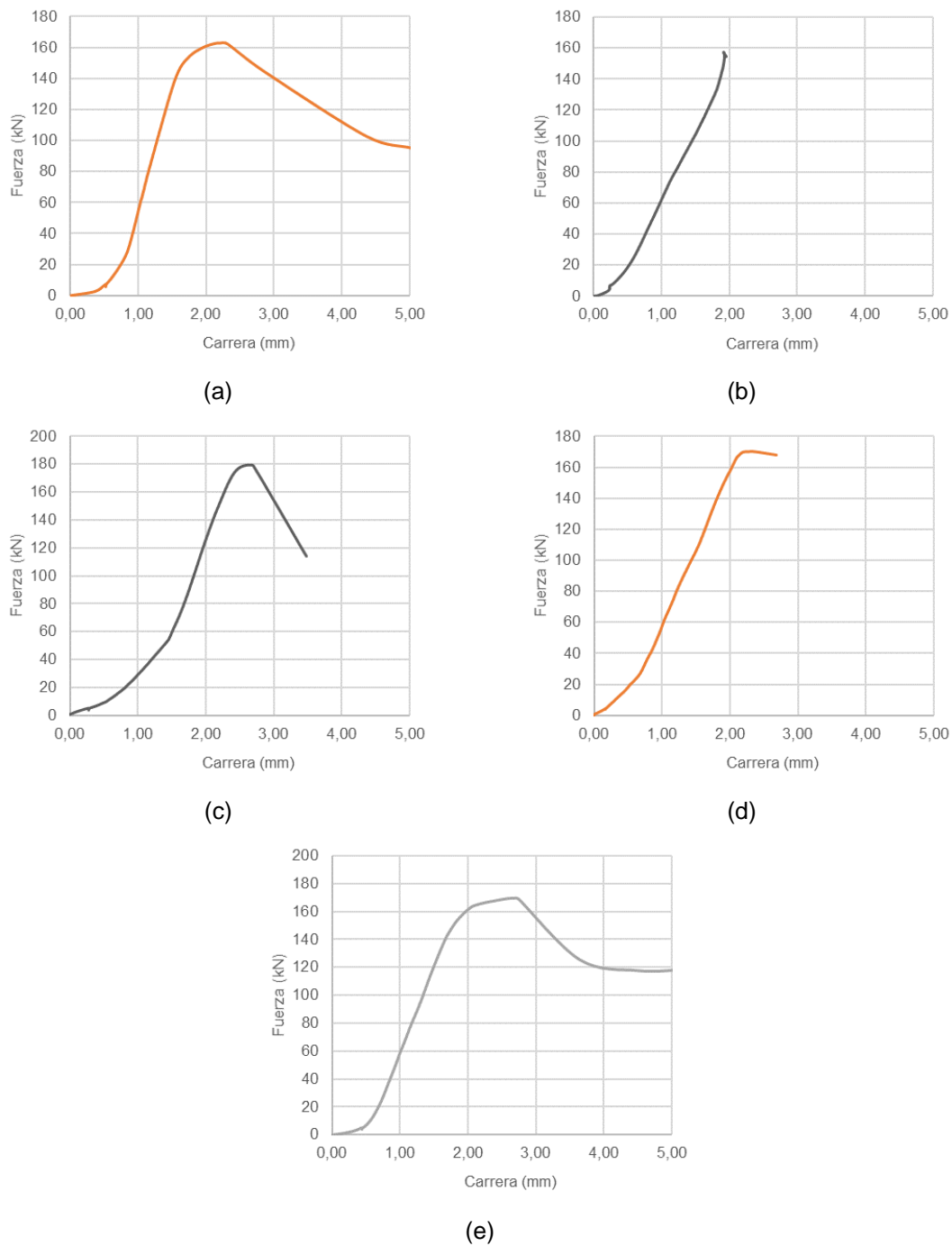


Figura 5.9 Gráfico de fuerza contra recorrido de pistón para (a) Muestra C1; (b) Muestra C2; (c) Muestra C3; (d) Muestra C4; (e) Muestra C5.

Ahora bien, durante los ensayos a tracción se observó un fenómeno interesante en cuanto a la composición de las probetas. Debido a la forma de rotura de las probetas, fue posible observar una sección transversal de las probetas ensayadas. Al observar dichas secciones, se encontraron dos cosas importantes (ver Figura 5.10).

1. El árido utilizado parece provenir de escorias siderúrgicas.
2. Durante la fabricación de las probetas hubo segregación de los agregados.

El tipo de árido encontrado, aunque afecta la resistencia de la pieza, no representa un problema para su uso. Sin embargo, la segregación de agregados puede modificar el comportamiento mecánico del hormigón.

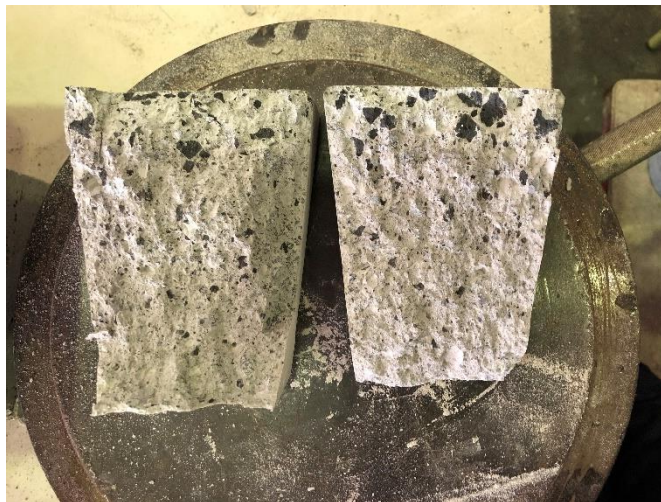


Figura 5.10 Sección transversal de las piezas de pavimento

5.5 CONCLUSIONES

Del estudio experimental se pueden definir una serie de conclusiones. En primer lugar, de los ensayos de consistencia se encontró que las dosificaciones ensayadas abarcan un espectro de consistencias importante. Para lo consiguiente ensayos se decidió utilizar las consistencias correspondientes a los dos extremos, es decir, una consistencia seca y una consistencia líquida. En este caso, correspondió al mortero M1 y al mortero M3.

En el caso de los ensayos de arrancamiento, no fue posible obtener un valor único para la resistencia al arrancamiento de cada uno de los morteros. Esto se debe a que dicha resistencia supera el límite de carga ejercido por el equipo dispuesto para realizar el ensayo. Se puede afirmar que los dos morteros tienen una resistencia al arrancamiento mayor a 25 kN. De igual manera, se espera que la resistencia final sea del orden de magnitud del valor presentado.

En último lugar, los ensayos de resistencia sobre las piezas mostraron que los adoquines presentan una resistencia adecuada, confirmado la hipótesis que, en caso de un eventual fallo, es más probable que este se de a través de la interface pieza-mortero antes que dentro de las piezas en sí. Así mismo, al poder observar la sección transversal de las piezas, fue posible determinar que durante su fabricación se generó segregación de segregación de árido, en este caso el árido grueso.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 INTRODUCCIÓN

Con lo mostrado en el apartado anterior se concluye el alcance planteado para este estudio. El estudio numérico presentado en el 2 estableció una base para el funcionamiento estructural esperado de las nuevas piezas de adoquín. Adicionalmente, el estudio experimental ahondó en los pormenores de los procesos constructivos e intentó cuantificar la resistencia a las piezas bajo una acción de desprendimiento. Con la información obtenida de las dos grandes partes de este estudio fue posible caracterizar el comportamiento esperado de las piezas una vez estas sean utilizadas en la obra pública.

El objetivo de este capítulo es resumir las principales conclusiones alcanzadas a lo largo del desarrollo del estudio. De igual manera, se busca realizar algunas recomendaciones para continuar el estudio de estas piezas en un futuro.

6.2 CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos presentados en el Capítulo 1.2, se han resumido las principales conclusiones que fueron alcanzadas y que son útiles para dar

cumplimiento a dichos objetivos. Ahora bien, del estudio presentado se puede llegar a la **conclusión general** de que fue posible caracterizar el comportamiento esperado de las nuevas piezas de adoquín diseñadas por el Ayuntamiento, y que dicho comportamiento será seguro, siempre y cuando se puedan garantizar una serie de condiciones específicas.

Ahora bien, las **conclusiones específicas** encontradas en cada sección del estudio son presentadas a continuación. En primer lugar, con respecto al estado del arte:

- El constante crecimiento de la población urbana genera una serie de retos que deben ser afrontados cuanto antes. Una de estas soluciones es la innovación a través de los pavimentos.

Con respecto al estudio numérico:

- Se realizó un estudio numérico sobre el comportamiento del sistema propuesto bajo cargas de tráfico pesado. En este estudio se encontró que el parámetro más importante que controla el comportamiento del sistema es la altura libre de mortero, es decir, la altura que existe entre la superficie superior de la pieza y el inicio del mortero. Se encontró que la altura óptima que garantiza el mejor comportamiento del sistema es de 10 mm. Alturas superiores pueden causar exceso de tensiones en los materiales lo que puede incrementar el riesgo de fallas.
- Con las cargas aplicadas el fallo se producirá sobre la interface entre el mortero y la pieza, antes que en algún otro componente del sistema. Por esta razón es necesario estudiar esta interface más a fondo.
- Para una altura libre de mortero de 10 mm, las piezas con inclinación de caras laterales de 7° sufren tensiones menores, sin embargo, sobre el mortero y la interface, las tensiones son menores cuando la inclinación de las caras laterales es mayor (0° y 3,5°).
- Ahora bien, como se mencionó anteriormente, la altura libre de mortero es el parámetro que más sobre el comportamiento del sistema, por lo tanto, para

inclinaciones de 0° y $3,5^\circ$ garantizar la altura de 10 mm es más difícil. Entonces, así estas alternativas produzcan menores tensiones, la opción más viable constructivamente son las piezas con inclinación de caras laterales de 7° .

Con respecto al estudio experimental:

- Durante la fase experimental de este estudio se inició evaluando tres tipos de mortero con diferentes consistencias. Para determinar las consistencias se utilizó la mesa de sacudidas. El mortero 1 tuvo una extensión de flujo de aproximadamente 15 cm, el mortero 2 de 19 cm y el mortero 3 de 21 cm. Debido a la similitud entre los valores encontrados y la consistencia observada entre el mortero 2 y el mortero 3, se decidió descartar el mortero 2.
- Después de varias iteraciones sobre el ensayo de arrancamiento propuesto, causadas por problemas en el anclaje de la pieza al sistema de tiro, se llegó a la conclusión que la mejor opción es la utilización de un anclaje químico y mecánico. Con este tipo de anclaje se llegó al límite de carga ejercido por dicho sistema de tiro. Para los dos morteros ensayados se llegó a una carga de 2,50 ton sin que sufrieran ningún tipo de desplazamiento.
- El cálculo teórico de la fuerza requerida para arrancar las piezas muestra que dicha fuerza es del orden de magnitud del límite encontrado. Sin embargo, teniendo en cuenta que dicho cálculo se realizó con un mortero similar más no igual al que se usó en las muestras, no es posible determinar un valor fijo para la fuerza.
- Se realizó un estudio sencillo de valoración de las dos alternativas. A partir de los valores ponderados obtenidos de los indicadores y de los criterios, se determinó que la alternativa del mortero 3 construido con el método industrial es la que posee más valor. Esto sucede principalmente por que dicha alternativa garantiza más fácil la altura libre de mortero, que como se demostró en el estudio numérico, es el factor que determina el comportamiento del sistema. Así mismo, esta opción es más fácil de realizar y más rápida. Ahora bien, es importante mencionar que este juicio puede cambiar mediante la utilización de otros métodos y/o herramientas constructivas.

- Los ensayos sobre las piezas individuales fueron satisfactorios. Las piezas muestran una resistencia tanto a compresión como a tracción aceptable. Sin embargo, se encontró que las piezas presentan segregación de sus áridos, donde los áridos más gruesos se encuentran mayormente ubicados hacia la cara superior de la pieza. Esto puede cambiar el comportamiento del sistema bajo las condiciones de tráfico.

6.3 RECOMENDACIONES

En primer lugar, se debe utilizar un montaje experimental con una fuerza de tiro mayor para poder determinar la verdadera resistencia al arrancamiento de las piezas. Se recomienda utilizar un gato hidráulico de poca capacidad. Habrá que cuidar que el anclaje sea lo suficientemente fuerte.

Se podrá verificar experimentalmente el comportamiento del sistema bajo otro tipo de solicitaciones. Se debe simular el efecto causado por el frenado y aceleración de los vehículos. Esta simulación se compondrá de dos ensayos. El primero de ellos es un ensayo con paralela a la cara de las piezas, es decir, carga horizontal. El otro ensayo que se podría realizar es un ensayo de torsión sobre la pieza. Sin embargo, para realizar estos ensayos se recomienda realizar una prueba de campo con vehículos reales.

7. REFERENCIAS

- AENOR. (2009). Norma UNE-EN 12390-3:2009 Ensayos de hormigón endurecido Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. AENOR. Retrieved from https://www-aenor-es.recursos.biblioteca.upc.edu/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?codigo=N0043808&tipo=N&pag=pagina_per_buscador.asp#.WiQX0UqnGUk
- AENOR. (2010). Norma UNE-EN 12390-6:2010 Ensayos de hormigón endurecido Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas. AENOR. Retrieved from https://www-aenor-es.recursos.biblioteca.upc.edu/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?codigo=N0046187&tipo=N&pag=pagina_per_buscador.asp#.WiQWc0qnGUk
- Battista, G., & Pastore, E. M. (2017). Using Cool Pavements to Mitigate Urban Temperatures in a Case Study of Rome (Italy). *Energy Procedia*, 113, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.027>
- Bhatta, B. (2010). Causes and Consequences of Urban Growth and Sprawl. In *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data* (p. 171). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05299-6>

- Cerámica Malpesa, S. A. (2003). *Recomendaciones de uso para adoquines cerámicos y ladrillos cara vista*. Bailén. Retrieved from <http://www.malpesa.es>
- Chen, J., Wang, H., & Zhu, H. (2017). Analytical approach for evaluation temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect. *Applied Thermal Engineering*, 113, 739–748.
- Chiarelli, A., Dawson, A. R., & García, A. (2015). Parametric analysis of energy harvesting pavements operated by air convection. *Applied Energy*, 154, 951–958. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.093>
- Chu, L., Fwa, T. F., & Tan, K. H. (2017). Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption of porous asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 141, 402–409.
- Da Silva, F. M., Gachet Barbosa, L. A., Lintz, R. C. C., & Jacintho, A. E. P. G. A. (2015). Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, 91, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.027>
- Efthymiou, C., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Koras, A. (2016). Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Solar Energy*, 130, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.054>
- EPA. (2008). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. Heat Island Reduction Activities. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:THFIUA>2.0.CO;2)
- Fini, A., Frangi, P., Mori, J., Donzellin, D., & Ferrini, F. (2017). Nature based solutions to mitigate soil sealing in urban areas: Results from a 4-year study comparing permeable, porous and impermeable pavements. *Environmental Research*, 156, 443–454.
- Ganjan, E., Jalull, G., & Sadeghi-Pouya, H. (2015). Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 77, 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.048>

- Gencil, O., Ozel, C., Koksai, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2012). Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, 21, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.023>
- Guo, L., & Lu, Q. (2017). Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 761–773.
- Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción* (1st ed.). Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/17/9589322824_Parte5.pdf
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E., & Ou, J. (2011). Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 44(9), 1645–1650. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.06.014>
- Hilti Corporation. (2012). HAT 28 Tester. Schaan: Hilti Corporation. Retrieved from https://www.hilti.co.uk/medias/sys_master/documents/h99/9144283987998/HAT-28-Tester-Operating-instructions-Technical-information-ASSET-DOC-LOC-4510051.pdf
- Humpola, B., Bullen, F., & Knapton, J. (1996). Quick quality control of concrete block pavers in Australia. In Ilan Ishai (Ed.), *Pave Israel 96: Proceedings, the Fifth International Conference on Concrete Block Paving* (pp. 55–64). Israel: Dan Knassim. Retrieved from <http://www.sept.org/techpapers/659.pdf>
- Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (2013). *Construcción de pavimentos de adoquines de hormigón*. Retrieved from http://ich.cl/descargas/wp-content/uploads/13-04-24_PAV_CON_construccion-de-pav-adoquines-de-hormigon.pdf
- Jankovic, K., Nikolic, D., & Bojovic, D. (2012). Concrete paving blocks and flags made with crushed brick as aggregate. *Construction and Building Materials*, 28, 659–663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.036>
- Khankhaje, E., Salim, M. R., Mirza, J., Salmiati, Hussin, M. W., Khan, R., &

- Rafieizonooz, M. (2017). Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell. *Applied Acoustics*.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.02.014>
- Kyriakodis, G.-E., & Santamouris, N. (2017). Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation project. *Urban Climate*.
- Li, H., Saboori, A., & Cao, X. (2016). Information synthesis and preliminary case study for life cycle assessment of reflective coatings for cool pavements. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2016.06.005>
- Limbachiya, V., Ganjian, E., & Claisse, P. (2016). Strength, durability and leaching properties of concrete paving blocks incorporating GGBS and SF. *Construction and Building Materials*, 113, 273–279.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.152>
- McCormack, T. (2006). *Driveways, Paths and Patios - A Complete Guide to Design Management and Construction by Tony McCormack*. Crowood Press. Retrieved from <http://www.crowood.com/details.asp?isbn=9781861267788&t=Driveways,-Paths-and-Patios---A-Complete-Guide-to-Design-Management-and-Construction>
- Pan, P., Wu, S., Xiao, Y., & Liu, G. (2015). A review on hydronic asphalt pavement for energy harvesting and snow melting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 624–634. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.029>
- Paving Directory. (2014). Block paving laying patterns. Retrieved October 9, 2017, from <https://www.paving.org/index.php/block-paving-laying-patterns/>
- Poon, C. S., & Chan, D. (2005). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 20, 569–577.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044>
- Portland Cement Association. (2002). *Mortar Cement: Product Data Sheet*. Skokie. Retrieved from http://www.cement.org/docs/default-source/fc_mat-app_pdfs/masonry/is281-mortar-cement-product-data-sheet.pdf?sfvrsn=6

- Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.177>
- Rehan, R. M. (2016). Cool city as a sustainable example of heat island management case study of the coolest city in the world. *HBRC Journal*, 12, 191–204.
- Rossi, F., Castellani, B., Presciutti, A., Morini, E., Anderini, E., Filipponi, M., & Nicolini, A. (2016). Experimental evaluation of urban heat island mitigation potential of retro-reflective pavement in urban canyons. *Energy and Buildings*, 126, 340–352.
- Sadek, D. M., El-Attar, M. M., & Ali, A. M. (2017). Physico-mechanical and durability characteristics of concrete paving blocks incorporating cement kiln dust. *Construction and Building Materials*, 157, 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.107>
- Said, I., Missaoui, A., & Lafhaj, Z. (2015). Reuse of Tunisian marine sediments in paving blocks: factory scale experiment. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.138>
- Santos, C., Penteado, G., Viviani De Carvalho, E., Cristina, R., & Lintz, C. (2015). Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 112, 514–520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.142>
- Sha, A., Liu, Z., Tang, K., & Li, P. (2017). Solar heating reflective coating layer (SHRCL) to cool the asphalt pavement surface. *Construction and Building Materials*, 139, 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.087>
- Udawattha, C., Galabada, H., & Halwatura, R. (2017). Mud concrete paving block for pedestrian pavements. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.08.005>
- United Nations. (1980). *Patterns of Urban and Rural and Rural Population Growth*.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2014). *World Urbanization Prospects. United Nations* (Vol. 12). <https://doi.org/10.4054/DemRes.2005.12.9>

- United Nations/DESA. (2013). *World Economic and Social Survey 2013*. New York: Department for Economic and Social Affairs. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.10.001>
- Wang, L., Yeung, T. L. K., Lau, A. Y. T., Tsang, D. C. W., & Poon, C. S. (2017). Recycling contaminated sediment into eco-friendly paving blocks by a combination of binary cement and carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1279–1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.070>
- Wattanasiriwech, D., Saiton, A., & Wattanasiriwech, S. (2009). Paving blocks from ceramic tile production waste. *Journal of Cleaner Production*, 17, 1663–1668. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.008>
- Yang, J., Wang, Z.-H., Kaloush, K. E., & Dylla, H. (2016). Effects of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix. *Building and Environment*, 108, 110–121.
- Yuan, J., Emura, K., & Farnham, C. (2017). Is urban albedo or urban green covering more effective for urban microclimate improvement?: A simulation for Osaka. *Sustainable Cities and Society*, 32, 78–86.
- Zhou, Z., Wang, X., Zhang, X., Chen, G., Zuo, J., & Pullen, S. (2015). Effectiveness of pavement-solar energy system - An experimental study. *Applied Energy*, 138, 1–10.
- Ziari, H., Barakoochi, A. T., & Moniri, A. (2017). Laboratory investigation of the effect of temperature on frictional properties of concrete pavements containing crushed glass. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 0–6. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.04.006>